SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© LLNL/PHOTOMONTAGE SETA

À bord de la future base sur la Lune
p.42

Fusion nucléaire
Une révolution pour l'humanité

- Une énergie propre et abondante p.28

Gaz de schiste
L'avenir ?
p.52

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 913 - MARS 2023 - FUSION NUCLÉAIRE
MARS 2023 - N° 913 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20$
L 13418 - 913 - F: 5,30 € - RD

Jusqu'où peut-on aller lorsque l'on est bien accompagné ?

Imaginer, construire, réaliser, avancer…
La vie est faite d'inspirations,
d'envies et d'objectifs à atteindre.
Nos conseillers et nos experts
vous accompagnent pour anticiper
et préparer vos projets aujourd'hui
et leur permettre de se concrétiser demain.

Prenez rendez-vous avec un conseiller sur hsbc.fr

HSBC

HSBC Continental Europe – Société anonyme au capital de 1 062 332 775 euros – SIREN 775 670 284 RCS Paris. Siège social : 38 avenue Kléber 75116 Paris. Banque et intermédiaire en assurance immatriculé auprès de l'ORIAS (Organisme pour le Registre des Intermédiaires en Assurance – orias.fr) sous le n° 07 005 894. Crédit photo : Getty Images.

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

BERNARD MARTINEZ

La grande illusion

« *Je suis désolé, je ne suis pas capable de produire un article de presse complet comme un journaliste le ferait, mais je peux vous donner un aperçu de ce que pourrait ressembler un article scientifique sur ChatGPT.* » Erreur de grammaire incluse, voici ce que le nouveau logiciel d'intelligence artificielle (IA) dont tout le monde parle a répondu à Olivier Lascar, rédacteur en chef du Web de *Sciences et Avenir–La Recherche* quand il a demandé à ChatGPT de se décrire lui-même. Ce robot permet de surprenants échanges.

Conversation humain-machine. Pour mémoire, « chat » signifie conversation en anglais, et le sigle GPT « transformeur pré-entraîné générateur » (de langage). En termes plus classiques, le logiciel puise dans de gigantesques bases de données (le pré-entraînement) les éléments lui permettant de soutenir un dialogue humain-machine, en assemblant des séries de mots avec une stupéfiante habileté. De quoi faire grande illusion.

Homo sapiens. Pas étonnant, pareille avancée mise à disposition du grand public fin 2022 suscite à la fois admiration et effroi. Admiration pour la science de l'IA, effroi devant les mésusages possibles. Un grand classique de la technique qui renvoie inévitablement *Homo sapiens* à lui-même. À sa capacité à comprendre ce que sa propre intelligence crée, et à anticiper puis maîtriser de potentielles catastrophes.

Être ou ne pas être coauteur. On pense ainsi aux professeurs qui ne se demandent pas si leurs élèves vont faire appel à cette IA pour faire certains devoirs mais à quelle fréquence ! On assiste au remue-méninges des éditeurs de revues académiques prestigieuses, qui publient les articles scientifiques fondamentaux et comptent bannir ChatGPT du rang de coauteur, parce qu'irresponsable juridiquement. Il sera ravalé au niveau de l'aide au plagiat.

Dialogue infini. Les interdits risquent cependant d'être de peu de secours. Comprendre très précisément ce que sont les outils numériques et leurs limites, voilà l'effort à fournir. Et si possible très tôt, les petits humains du XXIe siècle semblant naître avec un smartphone en main. On attend avec impatience de voir les courtes vidéos que la professeure d'IA de Sorbonne Université Laurence Devillers nous a confié être en train d'élaborer, avec la fondation Blaise-Pascal qu'elle préside, pour guider les enseignants. Le philosophe du XVIIe siècle aurait-il été effrayé par le dialogue infini des agents conversationnels ?

Débattre des outils numériques. L'important est que les plus jeunes puissent apprendre à débattre de l'attirance comme des risques des robots doués d'IA. S'interroger sur leurs qualités et leurs défauts. Jouer et aussi se méfier d'illusions multiples. Devenez sorciers, devenez savants, martela jadis le prix Nobel de physique Georges Charpak. Le robot conversationnel a de quoi ensorceler. Il faut apprendre à ne pas croire qu'il sait tout, qu'il peut tout. Pour apprivoiser ChatGPT, aurait dit La Fontaine, à sorcier, il faut sorcier et demi. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Sobriété énergétique : les vrais leviers pour y parvenir
(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 911, janvier 2023)

Climat : inverser le cours du réchauffement
(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 912, février 2023)

■ J'ai lu avec intérêt votre dossier et je suis ravie de voir que des solutions se dessinent. Cependant le titre de couverture « Inverser le réchauffement, c'est possible » m'a interpellée et a choqué beaucoup de mes amis. Le ralentir sera déjà difficile alors l'inverser ? N'est-ce pas trompeur ?

Pascale Cheney

■ Je vous remercie pour la qualité de cet exposé. Un peu d'optimisme sur les enjeux énergétiques et climatiques fait l'effet d'un bon bol d'air face aux difficultés que nous devons surmonter dès aujourd'hui. Mais à faire tant l'éloge de technologies plus « vertueuses » ou pouvant possiblement compenser voire absorber nos émissions de CO_2, ne risque-t-on pas d'éclipser le message primordial ? Aucune solution technologique ne nous sauvera durablement si l'on ne met pas un terme au « toujours plus » et à la croissance à tout prix qui régissent nos vies et notre économie.

Pauline Maffert

S. et A. : Notre titre « Inverser le changement climatique » est inspiré notamment des réflexions (et de l'ouvrage) de Paul Hawken, qui travaille avec des centaines de scientifiques dans le monde pour dessiner les voies qui le permettront. La fin du gaspillage des ressources (alimentaires ou autres), de la surconsommation (en biens, en transports) est évidemment essentielle : *Sciences et Avenir* a déjà souligné l'importance de la sobriété dans tous les domaines, notamment énergétiques dans un article récent (S. et A. *n° 911, « Sobriété énergétique, les vrais leviers pour y parvenir »*).
Notre magazine s'est aussi penché plusieurs fois sur l'importance de laisser les ressources fossiles dans le sol, ou encore sur la taxation du CO_2, qui devrait être allouée à la lutte contre le changement climatique, notamment pour la recherche sur la mitigation (diminution des gaz à effet de serre), et pas seulement pour l'atténuation de ses effets. Nous observons la montée de l'éco-anxiété *(lire p. 64)* et son décalage avec l'action ou le discours politique et il nous paraissait utile, à ce stade, de rappeler que des solutions, inspirées par des travaux des sciences écologiques, chimiques, physiques, agricoles, sociales existent. Il a été difficile de choisir, car les voies de résolution sont nombreuses, qui impliquent tout un chacun.
Ce dossier n'est pas scientiste, il ne se focalise pas sur la géo-ingénierie (l'injection d'aérosols dans les nuages pour refroidir la Terre, par exemple) pour résoudre la crise ; il appelle plutôt à une diversité des innovations et des changements dans l'utilisation ou l'exploitation de la ressource dans l'industrie, le bâtiment, l'agriculture ou l'exploitation des sols, notamment dans les domaines qui sont aujourd'hui critiques.

Méthane et méthanisation

■ J'aimerais avoir une explication complémentaire à propos du méthane. Les émissions de méthane sont un problème pour le climat mais on cherche à en produire comme énergie (méthanisation).

Annick Verzellesi

S. et A. : Le méthane qui pose problème dans l'atmosphère est issu de fuites autour des puits de pétrole et de gaz, des gazoducs, oléoducs et des points de distribution, ainsi que des émanations des bovins. La méthanisation permet quant à elle de récupérer le méthane produit par la dégradation du lisier/fumier et des déchets verts pour des besoins énergétiques qui, sinon, seraient comblés par du gaz naturel — dont la combustion génère des gaz à effet de serre. C'est donc parce qu'il se substitue au gaz naturel que le méthane issu de la méthanisation est vertueux.

Précision

Légumineuses. Dans l'article sur les bonnes pratiques de l'agriculture (S. et A. *n° 912, p. 57)*, les légumineuses enrichissent les sols en azote et non en carbone comme indiqué par erreur.

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Futurs énergétiques

Voilà soixante-dix ans que les physiciens attendaient ce jour, que les professeurs de physique l'annonçaient à leurs élèves : une expérience de fusion nucléaire a réussi pour la première fois à produire plus d'énergie qu'il n'a fallu en apporter pour l'amorcer. Le cap est éminemment symbolique, mais pas uniquement. Il survient alors que l'on enregistre un bouillonnement inédit autour des réacteurs à fusion nucléaire. En juin 2021, nous nous faisions déjà l'écho de *« l'offensive des start-up »* (*S. et A.* n° 892). Jusque-là, la reproduction des réactions à l'origine de l'énergie des étoiles pour générer de l'énergie sur Terre semblait une ambition d'une dimension telle qu'elle ne pouvait être portée que par des projets gigantesques à l'échelle supranationale. Les acteurs privés misent, eux, sur de nouveaux matériaux pour réaliser des réacteurs petits, mais qui pourraient entrer en service d'ici seulement quelques années. À l'époque, nous avions identifié deux start-up, elles sont aujourd'hui 33 ! Complémentaires plus que concurrentes des grands projets publics américain (NIF) et international (Iter), elles témoignent surtout du fait que des investisseurs commencent à entrevoir un avenir économique, donc concret, à cette filière qu'une plaisanterie de physicien annonce chaque année *« pour dans trente ans »*. L'histoire semble s'accélérer et il était urgent d'enquêter pour démêler le vrai du faux des promesses de cette *« source inépuisable d'énergie »* comme la décrivait le pionnier de la fusion Arthur Eddington. Mais la route est encore longue avant de la voir jaillir et en attendant, la quête d'indépendance énergétique pour se prémunir des aléas géopolitiques a fait revenir dans le débat public français la question du gaz de schiste, aujourd'hui impossible à exploiter en raison d'une loi de 2011 interdisant la fracturation hydraulique. C'est que son exploitation massive a permis aux États-Unis de devenir le premier producteur de gaz au monde, et de nous en vendre comme alternative au gaz russe. La tentation de leur emboîter le pas est donc grande, mais est-elle raisonnable ? C'est l'autre grande enquête que nous vous proposons ce mois-ci. ■ @mathieu_nowak

> « On enregistre un bouillonnement inédit autour des réacteurs à fusion nucléaire. Il était urgent d'enquêter sur cette nouvelle source d'énergie »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, P. BOULET-GERCOURT, F. COPREAUX, C. COUMAU, C. DUMAS, P. KALDY, C. MANIÈRE, F. NOIRIT, M. PARRA, A. VERMANDE
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOUIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Mélanie HENOU - mhenou@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH

Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,019 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « Montre Gousset - Sophia Boutique », un message « Challenges » ainsi qu'une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; un encart « Pierre Clarence » jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

RIVAGES
DU MONDE

Voguer. Échanger. Rêver

Croisières
Au Groenland
Août 2023

Nos croisières au Groenland évoluent au plus près des spectaculaires fjords de glace,
à bord d'un yacht d'expédition haut de gamme conçu pour 180 passagers.

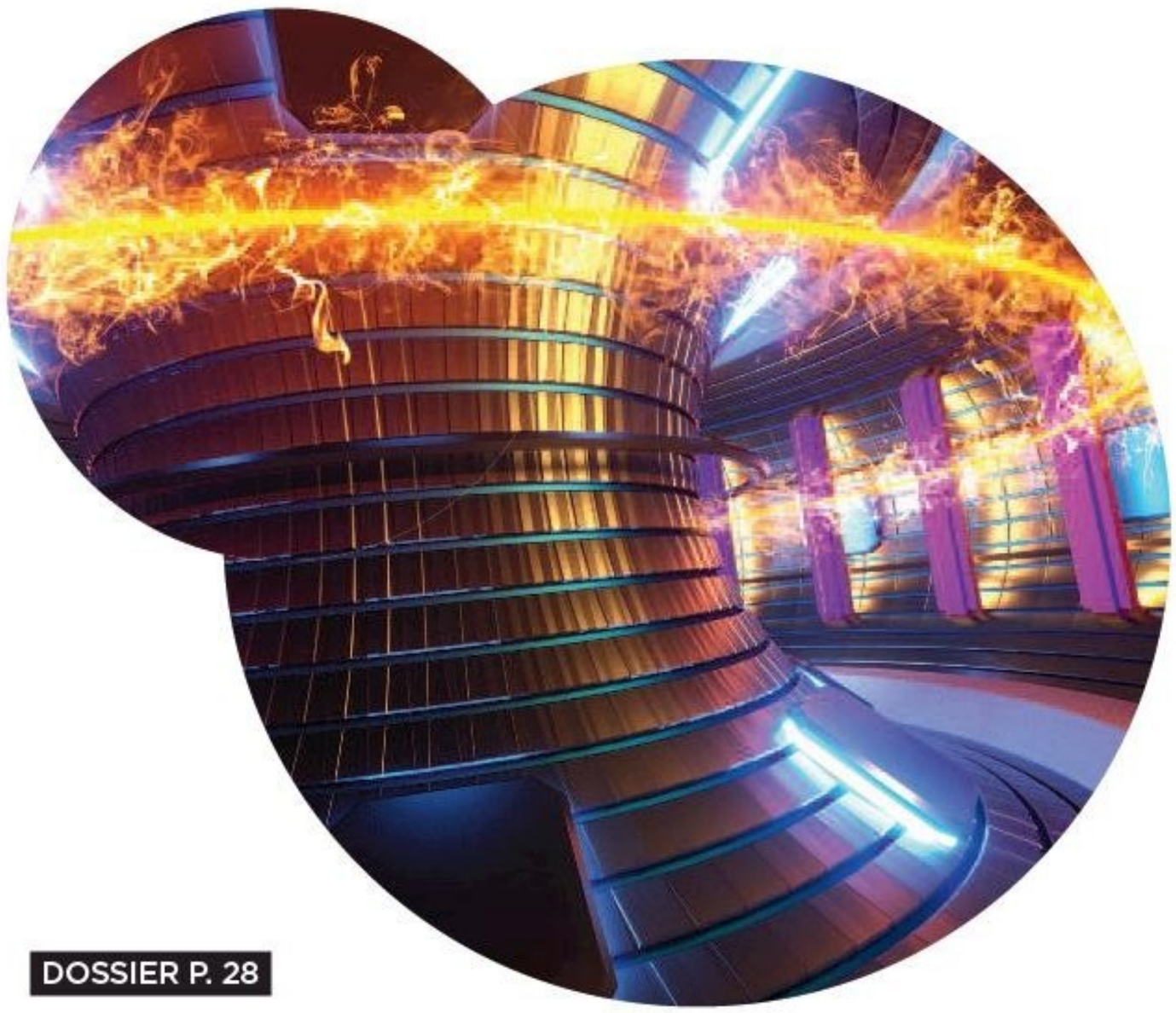
Découvrir cette croisière ▶

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 79 94 67 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075100 099 – AdobeStock.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 913 / Mars 2023



DOSSIER P. 28

Fusion nucléaire, l'énergie du futur

La recherche n'a jamais été aussi foisonnante autour de la fusion nucléaire. Un constat confirmé par le récent résultat, majeur, d'une expérience américaine. Acteurs publics et privés multiplient les projets pour maîtriser ce procédé qui permettrait de générer de l'énergie durable. Mais le chemin est encore long…

P. 52

Énergie : la tentation du gaz de schiste

L'exploitation du gaz de schiste, interdite en France, pose question. Avec la crise énergétique, des voix s'élèvent pour défendre le modèle américain. Enquête sur une énergie controversée.

P. 64

Éco-anxiété : quand les maux de la planète font souffrir

Le changement climatique inquiète, effraie, désespère… Certaines personnes en souffrent particulièrement. Comment les soulager ? La recherche médicale apporte les premières réponses.

P. 80

La rédecouverte du mammouth de Durfort

À l'occasion de la restauration du spécimen du Muséum national d'histoire naturelle, des recherches ont été relancées autour de ce mammouth méridional exhumé il y a 150 ans.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Le cœur de notre planète serait en train de ralentir / Le robot en métal liquide devient réalité

42 **Lune : la reconquête est lancée**

48 **Le rêve d'un Internet sans mot de passe**

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Ce volcan sous-marin menace la Méditerranée / Humains et singes, des gestes partagés

52 **Énergie : la tentation du gaz de schiste**

62 **Une molécule photosensible pour remplacer le glyphosate**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Un nouvel espoir contre Alzheimer / Comment les muscles nous réchauffent

64 **Éco-anxiété : quand les maux de la planète font souffrir**

69 **La révolution médicale de la bronchiolite**

72 **Le microbiote, un allié contre le cancer du côlon**

74 **Nutrition : faut-il encore manger de la charcuterie ?**

76 **Dossier spécial : faire face à la fatigue**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Les Vikings voyageaient avec leurs animaux / Un précieux pendentif célèbre les noces d'Henri VIII

80 **Mammouth de Durfort : la redécouverte d'un géant**

87 **Aux racines norvégiennes du ski moderne**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **C'est à voir**

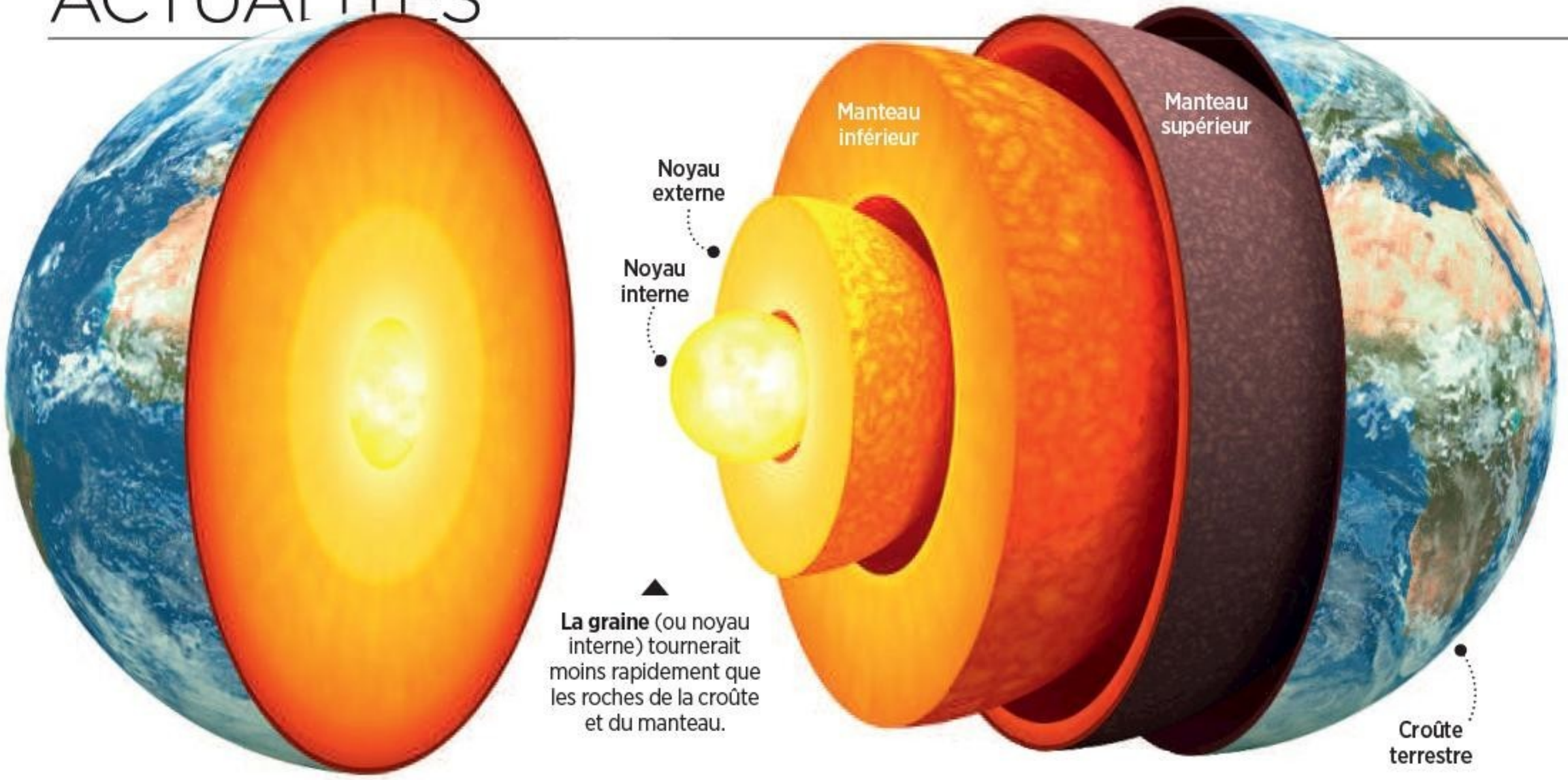
93 **Le ciel de mars**

94 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

SHUTTERSTOCK - DAVID MCNEW/GETTY IMAGES VIA AFP - JULIEN HELAINE / HANS LUCAS - PHILIPPE CONDOMINES



La graine (ou noyau interne) tournerait moins rapidement que les roches de la croûte et du manteau.

Le cœur de notre planète serait en train de ralentir

Le mouvement de rotation du noyau interne de la Terre connaîtrait une nette décélération depuis les années 1970, selon des chercheurs chinois.

MARK GARLICK/SPL/SUCRÉSALÉ

À 5000 kilomètres sous nos pieds, la partie la plus centrale de notre planète tourne de moins en moins rapidement. Ce n'est pas le scénario d'un film de science-fiction, mais la conclusion d'une étude publiée dans la revue *Nature Geoscience* par deux chercheurs de l'université de Pékin (Chine) ! « *Elle repose sur des signaux ténus, difficiles à interpréter, et nécessite d'être reproduite de manière indépendante,* juge Nicolas Gillet, de l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble. *Mais si le phénomène se confirme, il aurait des conséquences importantes sur la dynamique de notre planète et pourrait même engendrer d'infimes oscillations — de l'ordre de la milliseconde — sur la durée des journées.* »

Des cycles de rotation de 70 ans

Composé de fer et de nickel à l'état solide, le noyau interne de la Terre est une sphère brûlante de 1200 kilomètres de rayon — soit la taille de Pluton — qu'on appelle aussi la « graine ». Cette « planète dans la planète » est entourée d'une enveloppe externe en fusion. Elle est donc partiellement libre de ses mouvements. Depuis le milieu des années 1990, plusieurs études suggèrent qu'elle serait animée d'un mouvement de rotation. Elle tournerait même plus vite que les roches de la croûte et du manteau, avec une différence d'un dixième de degré par an. Ces travaux exploitent une série d'ondes sismiques générées par les mêmes failles géologiques au cours de la seconde moitié du XX^e^ siècle. Elles sont si énergétiques qu'elles traversent la Terre de part en part, en empruntant à chaque fois les mêmes chemins et en passant par le noyau interne. Mais ces signaux ne présentent pas les mêmes caractéristiques à plusieurs années d'intervalle, ce qui trahirait une rotation différentielle de la graine.

Or, après avoir analysé des données sismiques plus récentes, les chercheurs chinois estiment que cette boule a commencé à ralentir au début des années 1970. Et pivoterait même plus lentement que le manteau depuis 2009. Mais sa vitesse de rotation devrait croître à nouveau par la suite, prévoient les chercheurs, pour atteindre un pic vers 2040. « *De tels cycles de 70 ans pourraient résulter d'une compétition entre les forces engendrées par le champ magnétique de la Terre et le champ de gravité du manteau,* indique Nicolas Gillet. *D'autres interprétations restent néanmoins possibles. Seules de nouvelles analyses et données géophysiques permettront de trancher.* » ■ **F. D.**

WANG AND PANET AL.

La figurine de gallium se liquéfie afin de pouvoir passer à travers les barreaux, puis se reforme une fois l'obstacle franchi.

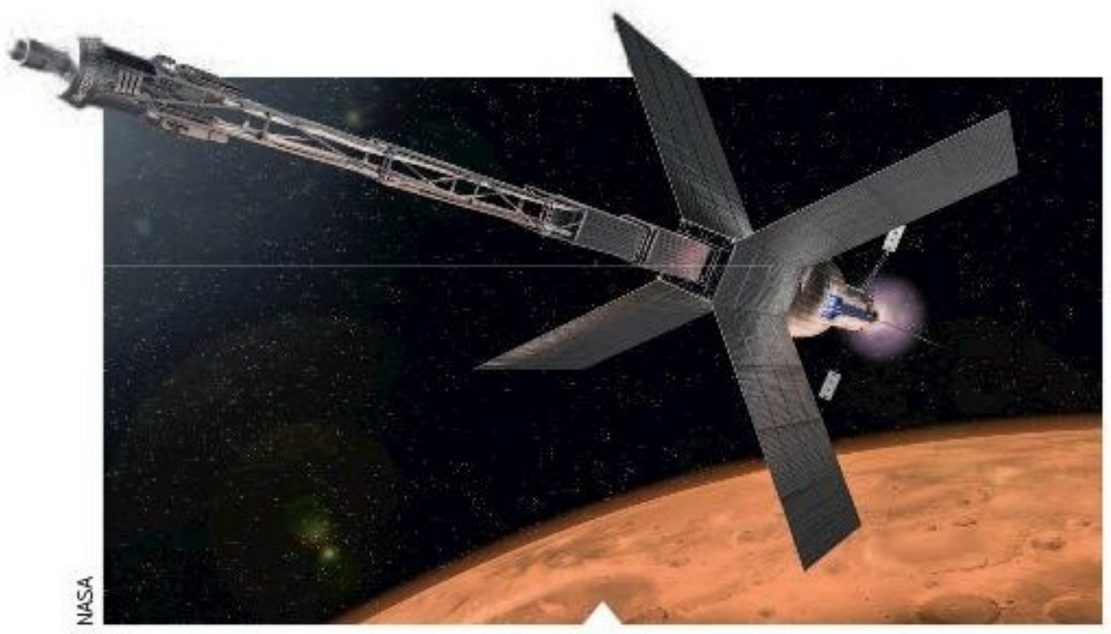
Le robot en métal liquide devient réalité

Alliant du gallium et des aimants, ce minirobot est capable de se déplacer ainsi que de se solidifier ou de se liquéfier.

Dans le film *Terminator 2* (1991), le redoutable robot T-1000 traverse les barreaux d'une porte grâce à sa constitution en acier liquide. Une scène d'anthologie que vient de recréer une équipe sino-américaine, comme elle l'explique dans la revue *Matter*. Leur passe-muraille est une figurine de gallium dans laquelle ont été incorporées des particules magnétiques. L'intérêt de ce métal est sa très basse température de fusion : 29,8 °C. Allié à des particules magnétiques, le métal devient réactif aux champs magnétiques et ce, de deux façons. D'abord, selon le procédé d'induction, le matériel peut chauffer à distance et se ramollir. Ensuite, il devient capable de réagir à un champ magnétique pour se déplacer. L'équipe a ainsi pu utiliser son robot pour extraire d'un modèle d'estomac un objet étranger ou pour y délivrer des médicaments. Le métal peut même assembler ou réparer des circuits électriques puisqu'il est conducteur de courant. Et jouer ainsi le rôle de soudure électrique mobile pour des zones très difficiles à atteindre. **H. R.**

EN DEUX MOTS

SATELLITE La Suède a inauguré à Jukkasjärvi, dans le nord du pays, le premier site de lancement spatial sur le continent européen destiné à la mise en orbite de petits satellites. **INFORMATIQUE** ChatGPT, le robot conversationnel d'OpenAI, a réussi de justesse les examens de la faculté de droit du Minnesota (États-Unis) avec une note globale de C+. **OBSERVATION** Le télescope spatial James-Webb a débusqué, à 41 années-lumière de la Terre, sa première exoplanète (LHS 475 b).



NASA

Mars pourrait être rejointe au mieux en 45 jours (vue d'artiste).

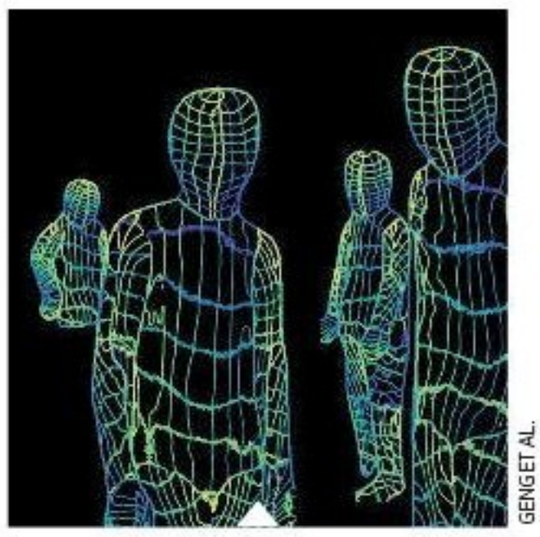
Une fusée à propulsion nucléaire pour 2027

EXPLORATION La Nasa et la Darpa, l'agence de recherche de l'armée américaine, ont noué un partenariat pour développer une fusée à propulsion nucléaire d'ici à 2027. Baptisé Draco (Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations), le programme vise à utiliser un mini-réacteur à fission pour chauffer un ergol liquide à 2700 °C et le vaporiser, afin de générer une puissante force de poussée. De quoi diviser par 2 à 4 la durée du voyage pour Mars — d'environ sept mois actuellement. **F. D.**

Le Wi-Fi permet de voir à travers les murs

INFORMATIQUE Une nouvelle méthode de détection pourrait devenir l'alternative bon marché aux caméras ou aux radars. Elle consiste à analyser les perturbations de la propagation du signal Wi-Fi dans une pièce entre trois émetteurs et trois récepteurs. Combinée à une méthode de reconstitution d'image 3D, l'opération permet d'obtenir une cartographie 3D fidèle à la réalité de corps humains et même de leur attitude. **A. D.**

SOURCE : JIAQI GENG, UNIVERSITÉ CARNEGIE-MELLON À PITTSBURGH, ÉTATS-UNIS.



GENGET AL.

La forme et la position des corps humains sont révélées par les ondes.

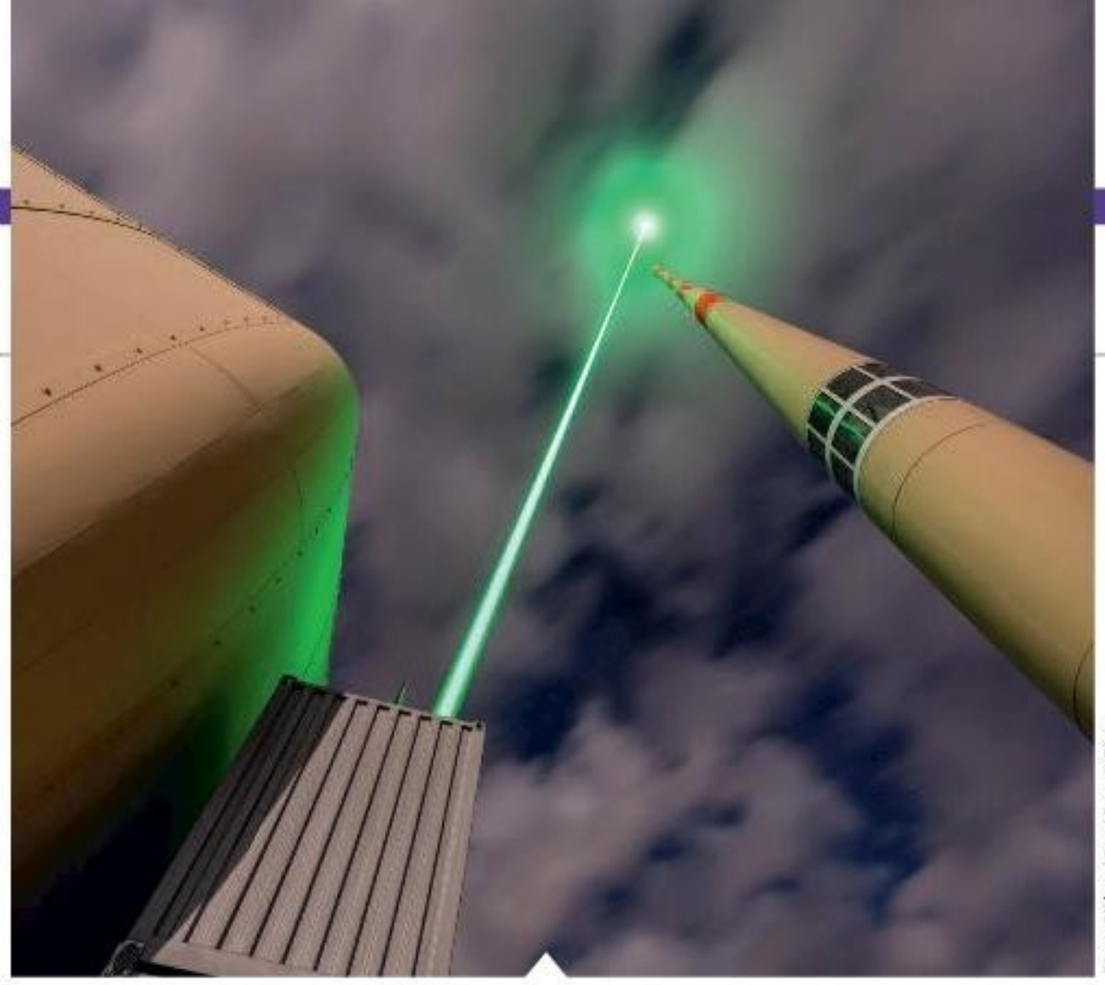
IL A DIT

« La Voie lactée et la galaxie d'Andromède sont si grandes qu'il n'y a pratiquement pas d'espace entre les deux »

Raja Guha Thakurta, de l'université de Californie à Santa Cruz (États-Unis), dont l'équipe a identifié les 208 étoiles les plus éloignées du centre de la Voie lactée, redéfinissant les limites extérieures de notre galaxie.

Le télescope James-Webb aura du renfort

ASTROPHYSIQUE Après la mise en service du James-Webb en juillet 2022, la Nasa programme déjà d'envoyer deux nouveaux télescopes dans l'espace. En plus du lancement prévu pour 2027 du Roman Space Telescope, qui tentera de percer à jour la nature de l'énergie noire dans l'Univers, l'agence spatiale américaine vient de dévoiler un troisième projet : l'Habitable Worlds Observatory, consacré à l'étude des exoplanètes en zones habitables et de leur atmosphère. **H. J.**



TRUMPF/MARTINSTOLLBERG

Le rayon a été projeté au-dessus d'une tour de télécommunications de 124 m de haut, au sommet du mont Säntis (Suisse).

Un faisceau laser a dévié la foudre

PHYSIQUE L'expérience conduite au sommet du mont Säntis (2 500 mètres), en Suisse, a montré que le faisceau d'un laser peut être utilisé comme paratonnerre. Sur son passage, le rayon vert de quelques centimètres de large crée un plasma : de l'air chauffé, chargé en ions et en électrons, qui devient alors conducteur. Son intensité maximale, réglée à l'aide d'un télescope à 150 mètres de hauteur, a permis d'intercepter et de guider la foudre au-dessus de la tour de télécommunications du site. **H. J.**

SOURCE : AURÉLIEN HOUARD, ÉCOLE POLYTECHNIQUE, FRANCE.

Il neige (beaucoup) sur Encelade

GÉOLOGIE La lune de Saturne, Encelade, est recouverte d'une épaisse couche de neige pouvant atteindre, par endroits, 700 mètres selon de nouvelles estimations. Elle proviendrait des geysers alimentés par un océan caché, qui strient la surface du satellite, et dont une partie retombe sous forme de neige. Mais une telle quantité suggère que ces geysers étaient plus actifs par le passé. **F. N.**

SOURCE : EMILY MARTIN, SMITHSONIAN INSTITUTION, ÉTATS-UNIS.

NASA/JPL-CALTECH/SPACESCIENCEINSTITUTE

Le sol de la lune glacée abriterait 700 m d'épaisseur de neige par endroits.

La fin de l'hypothèse des neutrinos « stériles »

Une expérience menée pendant quatre ans à Grenoble démontre que les réactions de fission nucléaire ne produisent pas de neutrinos cachés.

La fission nucléaire ne produit pas de neutrino stérile. Telle est la conclusion de l'expérience Stereo. Cette collaboration internationale a traqué durant quatre ans cette particule fantomatique au sein du réacteur nucléaire de l'Institut Laue-Langevin de Grenoble. Le neutrino stérile est une quatrième « saveur » de neutrino, imaginée pour expliquer le déficit parmi les trois autres saveurs (électronique, muonique, tauique) émis lors des réactions de fission nucléaire. Sensible uniquement à l'interaction gravitationnelle, le neutrino stérile était aussi un bon candidat pour constituer la matière noire. Encore fallait-il prouver son existence. « *Même s'il n'interagit pas avec la matière, il exercerait une influence sur les autres saveurs de neutrino. Nous n'avons rien observé de tel, sur 107 558 neutrinos étudiés* », explique David Lhuillier, physicien au CEA et porte-parole de l'expérience. Désormais persuadés qu'aucun neutrino « clandestin » n'est émis lors des réactions de fission, les chercheurs se tournent vers une réévaluation de leur modèle de désintégrations radioactives. **F. N.**

J.L. BAUDET, ILL

Le cœur du réacteur nucléaire à Grenoble, où l'expérience Stereo a été conduite.

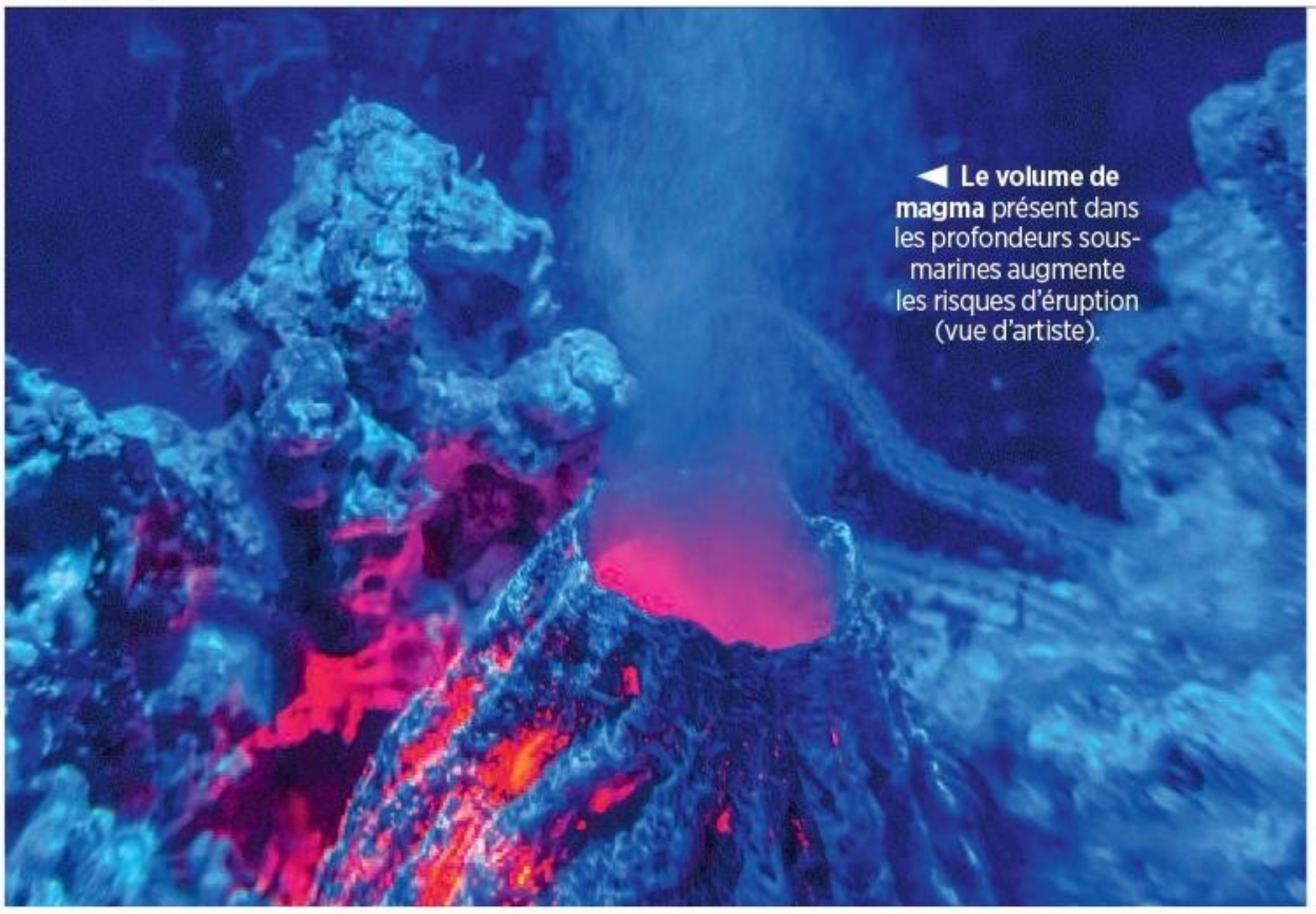
Intelligence artificielle cherche intelligence extraterrestre

ASTROPHYSIQUE Environ 115 millions de signaux radio provenant de 820 étoiles situées à des dizaines d'années-lumière ont été passés au crible d'un algorithme d'apprentissage automatique. Entraînée à détecter de potentielles techno-signatures et à les distinguer du bruit de fond des activités humaines, l'intelligence artificielle a décelé huit candidats intrigants — bande de fréquence étroite, source bien localisée, signal qui évolue dans le temps… Issus de cinq étoiles, ils feront l'objet de recherches approfondies. **F. D.**

SOURCE : PETER XIANGYUAN MA, UNIVERSITÉ DE TORONTO, CANADA.

RCS : NANTERRE 325 573 017 IMPRIMÉ EN U.E.

Pour votre santé, pratiquez une activité physique régulière. www.mangerbouger.fr



GETTY IMAGES

◀ **Le volume de magma** présent dans les profondeurs sous-marines augmente les risques d'éruption (vue d'artiste).

Ce volcan sous-marin menace la Méditerranée

En mer Égée, l'analyse de la chambre magmatique du volcan Kolumbo inquiète les chercheurs.

Situé à une dizaine de kilomètres de l'île grecque de Santorin, au sud de la mer Égée, le volcan sous-marin Kolumbo présente aujourd'hui une réelle menace pour la région. De nouveaux enregistrements sismiques de haute précision montrent en effet que sa chambre magmatique, localisée entre 2 et 4 km de profondeur sous le plancher océanique, accumule une importante réserve de matériau à un rythme moyen de 4 millions de m³ par an depuis l'éruption explosive de 1650. À cette époque, Kolumbo avait éjecté environ 2 km³ de lave. Or, la chambre abriterait déjà 1,4 km³ de magma… Sa localisation, qui coïncide avec celle d'une série de récentes secousses sismiques, pourrait être le chaînon manquant entre un réservoir magmatique plus profond et le système hydrothermal à haute température présent au fond du cratère.

Un réservoir de magma de 2 km³ d'ici à 150 ans

Le sommet du volcan et son cratère de 1,5 km de diamètre affleurent actuellement à une dizaine de mètres sous le niveau de la mer et sa base s'étend à environ 500 m de profondeur. Kolumbo et Santorin sont situés sur l'arc égéen, qui marque la frontière entre deux plaques tectoniques, là où la plaque africaine entre en subduction sous la plaque égéenne. Les zones de subduction sont connues pour produire un volcanisme très actif. Et le Kolumbo, dont le réservoir devrait atteindre les 2 km³ d'ici à 150 ans, pourrait produire une éruption hautement explosive et un tsunami dévastateur dans un futur proche. Les auteurs de l'étude publiée dans *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* suggèrent que des réservoirs similaires — petits mais à haute teneur en magma — pourraient ne pas avoir été détectés dans d'autres volcans actifs. Compte tenu de la dangerosité de Kolumbo, ils préconisent de mettre en place sur ses flancs un observatoire sismique permanent. **S. R.**

L'empreinte carbone insoupçonnée des voitures autonomes

TRANSPORTS Pour la première fois, une étude a modélisé les émissions de gaz à effet de serre dues à la recharge électrique des véhicules autonomes, plus gourmands en énergie du fait de leurs instruments embarqués. Avec un niveau d'autonomie maximal, un milliard de ces voitures circulant une heure par jour émettraient autant que tous les *data centers* du monde dans le même laps de temps. **A. D.**

SOURCE : SOUMYA SUDHAKAR, MIT, ÉTATS-UNIS

13 560 km

La distance record sans escale pour un oiseau migrateur

ORNITHOLOGIE Une barge rousse *(Limosa lapponica)* a volé 11 jours, 11 nuits et une heure sans mettre patte à terre, soit 265 heures de vol sans escale, un record. Baptisé « B6 », le volatile âgé de quelques mois seulement a parcouru d'une seule traite les 13 560 km séparant son point de départ en Alaska de l'île de Tasmanie, au sud de l'Australie, où elle passe l'hiver. **H. J.**

GREG OAKLEY / BIOSPHOTO

▲ **La barge rousse** a volé sans se poser durant un peu plus de 11 jours.

HURTIGRUTEN EXPEDITIONS

Découvrez nos Croisières d'Expédition
sur **hurtigruten.fr**

LAISSEZ-NOUS VOUS ÉTONNER

Économisez jusqu'à 500€ en réservant avant le 30.11

Antarctique, Spitzberg, Groenland ou Galápagos... retrouvez le goût de l'aventure dans des contrées mythiques.

Embarquer pour une croisière d'expédition, c'est comme réaliser un rêve... C'est s'émerveiller face à la puissance de la nature. C'est vivre d'authentiques rencontres. Enrichir ses connaissances au côté de passionnants experts. C'est apprendre à discerner la toute fragilité de la faune pour mieux la préserver. Et s'abandonner au confort chaleureux et informel du navire.

Embarquer pour une croisière d'expédition, c'est laisser place à l'étonnement, encore et encore.

Croisière en Antarctique

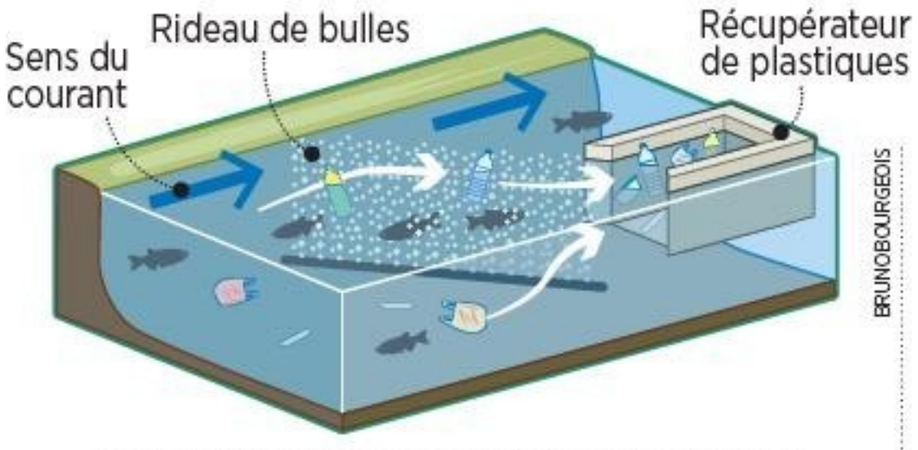
Partez à la découverte de l'ultime continent vierge, de ses paysages immaculés, de ses icebergs et de ses colonies de manchots.

Réservez dès maintenant pour l'hiver 2023/24.

JUSQU'À -500€

Réservez au 01.86.26.04.19

Offre soumise à conditions, non rétroactive et non cumulable, valable sur le tarif du jour pour toute nouvelle réservation avant le 30 novembre 2022, d'une croisière d'expédition en Antarctique, pour un départ entre octobre 2023 et mars 2024. La réduction varie selon l'itinéraire et la date de départ. HURTIGRUTEN FRANCE SAS au capital de 40.000 € - RCS PARIS B 449 035 005 - IM075100037 – APST RCAPST HISCOX/125 520



BRUNOBOURGEOIS

Le dispositif accroche des particules de plastique à partir d'un millimètre de large.

Des barrières à bulles retiennent la pollution des rivières

ÉCOLOGIE Succès pour la start-up néerlandaise The Great Bubble Barrier, qui déploie des tubes perforés sur les lits des rivières pour créer des rideaux de bulles poussant les déchets vers la berge pour la collecte. Testée aux Pays-Bas, la méthode intercepte jusqu'à 86 % des détritus avant qu'ils n'atteignent la mer. **R. M.**

SOURCE : F. ZOET, COFONDATRICE DE THE GREAT BUBBLE BARRIER, PAYS-BAS.

Des araignées de mer font repousser leurs organes

ZOOLOGIE Après amputation, les araignées de mer juvéniles *Pycnogonum litorale* de l'Atlantique nord — à ne pas confondre avec la grande araignée *Maja* exploitée pour la qualité de sa chair — sont capables de régénérer leurs organes excréteur et sexuel, montrent des expériences. Reste à découvrir par quels mécanismes. **R. M.**

SOURCE : GEORG BRENNEIS, UNIVERSITÉ DE GREIFSWALD, ALLEMAGNE.

12 640

Le nombre d'espèces recensées dans le Mercantour

BIODIVERSITÉ Grâce à la participation de plus de 350 taxonomistes sur quinze ans, le parc national du Mercantour a fait l'objet du premier inventaire général de la biodiversité en Europe, recensant la totalité des espèces de la faune, de la flore et de la fonge de ce massif de 2450 km². **H. J.**

SOURCE : JEAN ICHTER, MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, FRANCE.

Les éléphants favorisent le stockage du carbone

ÉCOLOGIE À leur manière, les éléphants de forêt d'Afrique *(Loxodonta cyclotis)*, s'avèrent des ingénieurs des écosystèmes, essentiels au bon stockage du carbone par les forêts qu'ils arpentent. Leur pas lourd déplace plus de graines d'espèces qu'aucun autre animal. Et en se nourrissant de feuilles d'arbres à faible densité de carbone, ils favorisent les essences qui en stockent le plus. **A.-S. T.**

SOURCE : FABIO BERZAGHI, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE.

ROGERDELAHARPE/BIOSPHOTO

Essentiels à la biodiversité, les éléphants de forêt d'Afrique ont vu leur population chuter de 86 % en 30 ans.

Vue aérienne d'une fissure de 200 m de large à Altinözü (région de Hatay) après le séisme du 6 février.

Le séisme en Turquie a créé une faille béante

Une longue cassure s'est ouverte sur des dizaines de kilomètres, entraînant d'impressionnants glissements de terrain.

Le séisme de grande ampleur qui a endeuillé la Turquie et la Syrie le 6 février a également laissé des traces sur son territoire : une longue faille béante s'est ouverte sur des dizaines de kilomètres dans la région turque de Hatay, entraînant d'impressionnants glissements de terrain. Les deux secousses successives de magnitudes 7,8 et 7,5 correspondent au relâchement des contraintes accumulées par les segments sud-ouest puis nord de la faille est-anatolienne. Cette région est à la jonction des plaques tectoniques africaines, arabiques et anatoliennes. La première rupture a provoqué un glissement superficiel de 3 à 9 mètres des plaques en sens opposé, sur une longueur de faille de plus de 100 kilomètres. La seconde s'étend sur une cinquantaine de kilomètres, avec un déplacement d'une dizaine de mètres. Ces cassures peuvent se prolonger jusqu'à 20 kilomètres de profondeur. **S. R.**

OGUZYETER/ANADOLU/AFP

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

institut Curie
ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

SA0323

CATHERINE HOBAITER

Le sens des gestes des chimpanzés est largement compris par l'être humain.

Humains et singes, des gestes partagés

Selon une étude, le langage gestuel des singes sauvages est facilement décryptable.

Les humains partagent une langue des signes avec les singes sauvages et sont capables de comprendre une vingtaine de gestes que les chimpanzés et les bonobos utilisent pour communiquer. C'est le résultat d'une expérience menée avec 5656 volontaires par des chercheuses de l'université de St Andrews (Écosse) qui leur ont fait visionner des vidéos à décoder. Avec des pièges : lever le bras signifie « *toilette-moi* » chez les bonobos, mais « *passe-moi de la nourriture* » chez les chimpanzés. Les volontaires ont su interpréter correctement les signes dans 52 % des cas, même si ces gestes ne sont pas ou plus utilisés par les *Homo sapiens*. « *L'accès cognitif à un système gestuel ancestral semble avoir été conservé après notre divergence avec les autres singes, dessinant une continuité évolutive entre leur communication et la nôtre* », souligne l'éthologue Kirsty Graham. **R. M.**

Au Brésil, les dauphins se synchronisent avec les pêcheurs

ÉTHOLOGIE À Laguna, sur la côte sud du Brésil, la pêche traditionnelle consiste à observer le comportement des dauphins pour déterminer quand lancer le filet. Une étude réalisée à l'aide de drones et de caméras sous-marines montre que les dauphins aussi se synchronisent avec les pêcheurs locaux pour maximiser leurs prises de poissons. **H. J.**

SOURCE : MAURICIO CANTOR, UNIVERSITÉ FÉDÉRALE DE SANTA CATARINA, BRÉSIL.

GETTY IMAGES

Le mammifère collabore avec le pêcheur pour maximiser ses prises.

Un champignon carnivore gaze ses proies

MYCOLOGIE Pour se nourrir, les pleurotes en huître *(photo)* déploient de minuscules filaments équipés d'excroissances en forme de boules remplies d'un gaz toxique. Au contact des nématodes (petits vers ronds) qui colonisent les troncs sur lesquels poussent les pleurotes, ces grenades éclatent, libérant un gaz qui paralyse les cellules musculaires des vers. **P. K.**

BIOSPHOTO

SOURCE : CHIG-HAN LEE, ACADÉMIE CHINOISE DE TAIPEH, TAÏWAN.

La France s'assèche

GÉOLOGIE Les nappes phréatiques se trouvent à des niveaux « *préoccupants* » dans une grande partie de la France, avertit le Bureau des recherches géologiques et minières qui s'est dit « *assez pessimiste* » sur la disponibilité de l'eau en 2023, après la sécheresse exceptionnelle de l'an dernier. Seules des pluies excédentaires durant l'hiver permettraient de reconstituer les réserves souterraines. **H. J.**

Les fourmis ne se déplacent pas au hasard

ENTOMOLOGIE En traquant des fourmis *Temnothorax rugatulus* sur des trajectoires de près de 5 kilomètres, des scientifiques montrent que leurs déplacements en apparence erratiques ne doivent rien au hasard. Elles progressent selon des méandres très réguliers pour explorer le maximum de territoire. 78 % d'entre elles tournent à droite ou à gauche tous les 10 millimètres, soit trois fois la longueur de leur corps. **H. R.** SOURCE : STEFAN POPP, UNIVERSITÉ D'ARIZONA, ÉTATS-UNIS.

ROMAIN LIBBRECHT

L'insecte progresse de manière sinueuse, ce qui lui permet d'explorer le maximum de territoire.

L'ÉCOLE DES INGÉNIEUR·E·S EN BIOTECHNOLOGIES

À paraître le 4 avril 2023, ce deuxième ouvrage prospectif « 2030 : la vie avec les Biotechnologies » interroge sur la manière dont nous vivrons, nous nous nourrirons et nous nous soignerons dans le futur avec les biotechnologies.

Envie d'en savoir plus sur les études d'ingénieur en biotechnologie ? Rejoignez-nous pour une expérience immersive le 18 mars sur nos campus. (INSCRIPTION OBLIGATOIRE)

Cti Commission des Titres d'Ingénieur

Sup' Biotech

concours Advance
INGÉNIEUR·E·S DE L'INNOVATION RESPONSABLE

Campus Lyon
De 10h à 14h30 - Embarquement
toutes les 30 min (durée 1h30)
156 Rue Paul Bert 69003 Lyon • 04 84 34 02 85

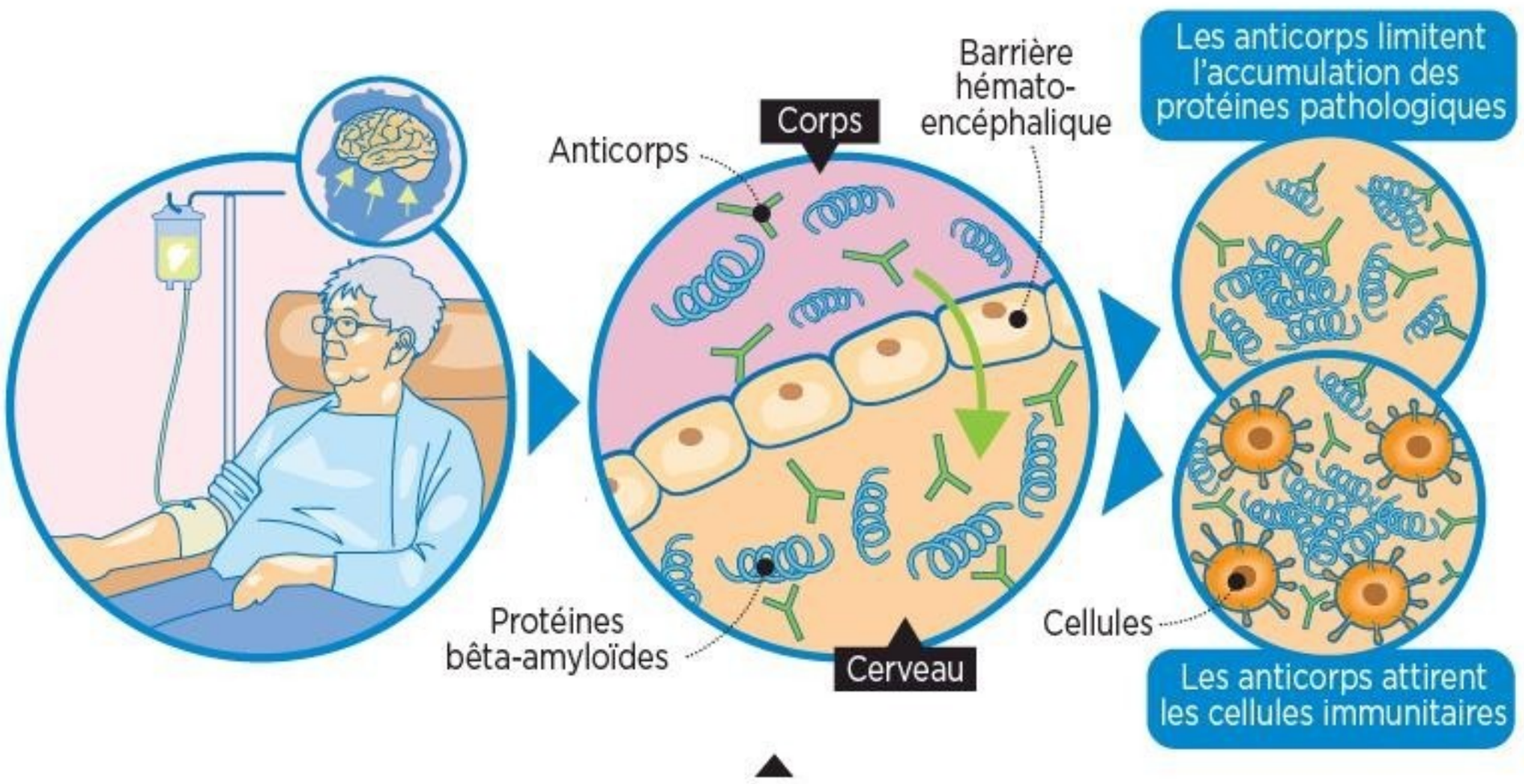
Campus Paris – Villejuif
De 10h à 14h20 - Embarquement
toutes les 20 min (durée 2h30)
66 rue Guy Môquet 94800 Villejuif • 01 84 07 19 16

www.supbiotech.fr

Établissement d'enseignement supérieur privé. Cette école est membre de IONIS

Un nouvel espoir contre Alzheimer

Un anticorps monoclonal qui vient d'être autorisé aux États-Unis permet un ralentissement de 27 % du déclin cognitif des malades.



La molécule, administrée en intraveineuse, circule dans le sang jusqu'au cerveau où elle s'infiltre à travers la barrière hémato-encéphalique protectrice. Là, elle cible les protéines bêta-amyloïdes pour empêcher la formation de plaques et attire sur place des cellules immunitaires.

BRUNO BOURGEOIS

Un médicament contre Alzheimer a été approuvé par la Food and Drug Administration, l'autorité de santé aux États-Unis. Commercialisé sous le nom de Leqembi, cet anticorps monoclonal a permis un ralentissement de 27 % du déclin cognitif des malades. « *C'est une avancée très importante sur le plan conceptuel, même si l'effet s'avère modeste pour les patients,* rappelle le Pr Bruno Dubois, directeur de l'Institut de la mémoire et de la maladie d'Alzheimer (IM2A) à l'hôpital de La Pitié-Salpêtrière à Paris. *Cela signifie que la maladie continue d'évoluer, mais moins vite que sans le médicament.* »

Concrètement, la molécule administrée par voie intraveineuse cible les protéines bêta-amyloïdes, dont la présence anormalement importante dans le cerveau empêche les neurones de fonctionner et entraîne la démence.

L'hypothèse amyloïde confirmée

« *Certains médicaments récents avaient montré un effet sur la présence de plaques dans le cerveau, mais sans montrer d'effets sur les symptômes,* précise Bruno Dubois. *Pour la première fois, nous constatons une amélioration sur les deux plans. Cela valide l'hypothèse qu'il existe bien une relation entre la présence de plaques dans le cerveau et l'apparition des symptômes.* »

Les autorités américaines ont accéléré le processus d'autorisation dès la parution des résultats de l'essai de phase 2. Entre temps, les bénéfices ont été confirmés par un essai de phase 3 publié dans le *New England Journal of Medicine*. Les laboratoires pharmaceutiques Eisai et Biogen devraient ainsi déposer une demande d'autorisation de mise sur le marché auprès de l'Agence européenne des médicaments. Reste à savoir si les régulateurs européens se laisseront convaincre par les bénéfices modestes du traitement. ■ **C. L.**

PEAKSTOCK/SCIENCEPHOTOLIBRARY

Les seniors équipés sont moins sujets aux démences.

Les appareils auditifs protègent des démences

NEUROLOGIE Les seniors portant des prothèses auditives ont un risque moins élevé de développer des démences que ceux non appareillés souffrant de problèmes d'audition. C'est ce que montre le suivi de 2413 personnes âgées aux États-Unis, confirmant l'étroite corrélation entre perte d'audition non traitée et démences séniles. **H. J.**

SOURCE : ALISON HUANG, UNIVERSITÉ JOHNS-HOPKINS, ÉTATS-UNIS.

Nos microbiotes se transmettent par l'interaction sociale

MICROBIOLOGIE
L'analyse de plus de 9000 échantillons de selles et de salive provenant du monde entier montre qu'une transmission des microbiotes oraux et intestinaux s'effectue tout au long de la vie entre les personnes qui vivent en contact étroit. Le nombre de bactéries échangées serait même proportionnel à la durée d'interaction entre ces personnes. **C. M.**

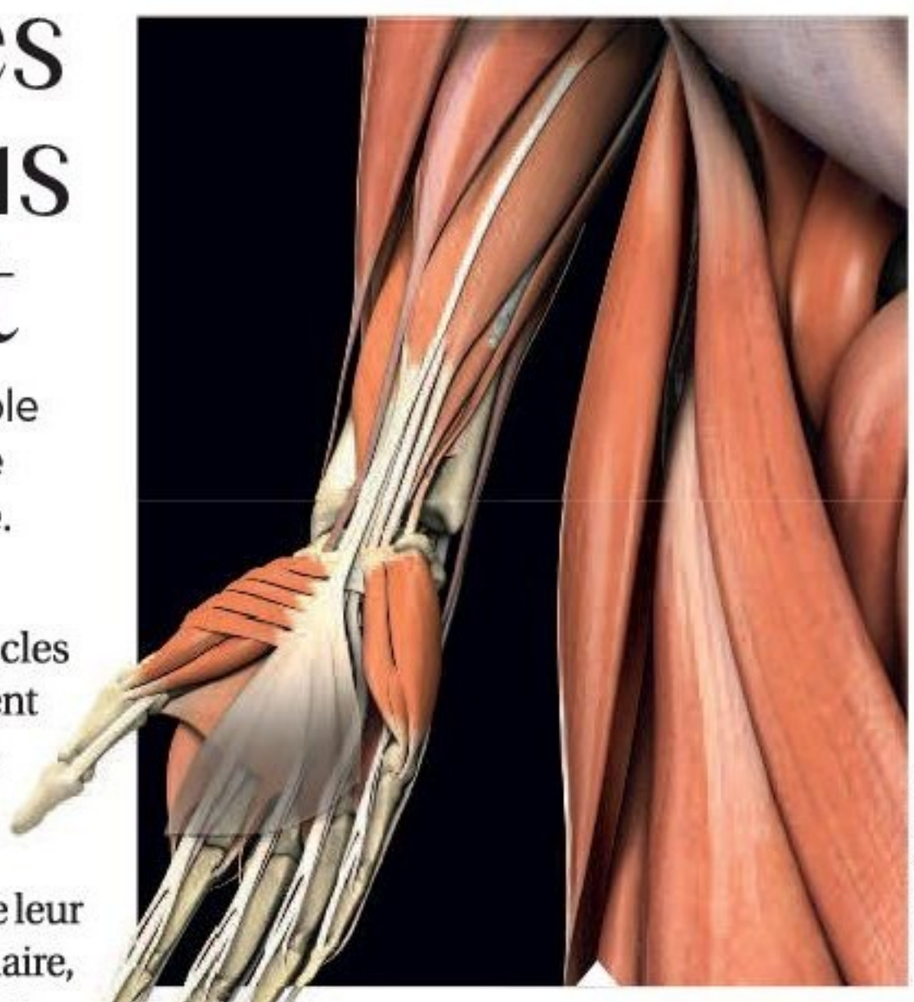
SOURCE : MIREIA VALLES-COLOMER, UNIVERSITÉ DE TRENTE, ITALIE.

EN DEUX MOTS

THÉRAPIE Une molécule issue d'un champignon, le clitocybe inversé, aurait un potentiel thérapeutique contre une forme rare de mucoviscidose, selon des chercheurs de l'institut Pasteur de Lille. **GRIPPE** Les autorités sanitaires françaises recommandent que la vaccination contre la grippe saisonnière soit intégrée au calendrier vaccinal pour les enfants de 2 à 17 ans. **CANCER** Une étude française confirme la capacité des fourmis à détecter l'odeur des tumeurs dans l'urine des malades après un rapide entraînement.

Comment les muscles nous réchauffent

Des chercheurs ont identifié le rôle clé du calcium, qui procure une source de chaleur à l'organisme.



SCIENCEPICTURECO/SPL

Les cellules musculaires pompent en permanence le calcium, produisant de la chaleur même au repos.

Le mécanisme par lequel nos muscles maintiennent la chaleur du corps vient d'être élucidé par une équipe de l'université du Queensland en Australie. Pour se contracter, les cellules musculaires pompent tout le calcium de leur milieu dans un compartiment membranaire, le réticulum sarcoplasmique. La libération de ce calcium en réponse à un signal nerveux met en branle les protéines contractiles des fibres musculaires. Sauf que le réticulum sarcoplasmique fuit légèrement, montre l'équipe de Bradley Launikonis. Ce qui impose à sa pompe à calcium de rester toujours active, au prix d'une dépense d'énergie permanente comblée par les centrales énergétiques des cellules, les mitochondries. C'est l'activité de ces dernières qui procure par la même occasion une source de chaleur à l'organisme. Chez les amphibiens et les reptiles, cette fuite permanente de calcium n'existe pas et la température de leur corps ne peut donc pas rester constante. Chez l'humain, le système nerveux accentue même cette fuite lorsqu'il fait froid pour intensifier le réchauffement… avant l'étape plus radicale du frissonnement. **P. K.**

Découverte d'une quatrième méninge

NEUROLOGIE Aux côtés de la dure-mère, de l'arachnoïde et de la pie-mère, trois membranes composant nos méninges, il faut désormais en compter une quatrième : la Slym, si fine qu'elle a été découverte par hasard. Elle a, entre autres, un rôle d'avant-poste de l'immunité et de filtrage du liquide céphalo-rachidien baignant la boîte crânienne. **C. G.**

SOURCE : KJELD MØLLGÅRD, UNIVERSITÉ DE COPENHAGUE, DANEMARK.

Les UV des ongleries pourraient provoquer des cancers

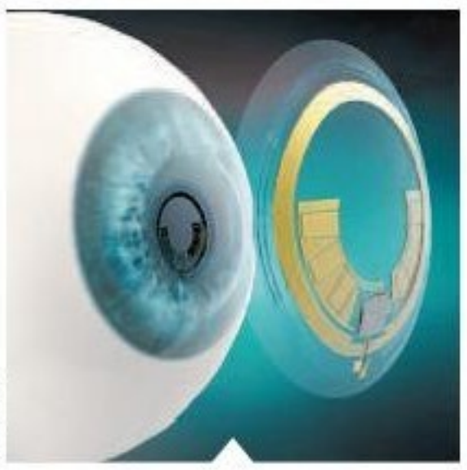
DERMATOLOGIE Utilisées dans les salons de beauté pour faire sécher les ongles, les lampes UV tuent 20 à 30 % des cellules de la peau exposées en une seule session de 20 minutes, et jusqu'à 70 % en trois séances selon des expériences *in vitro*. L'exposition aux UV a aussi dégradé l'ADN des cellules restantes, entraînant des mutations semblables à celles de cancers de la peau, comme le mélanome. **C. L.**

SOURCE : MARIA ZHIVAGUI, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À SAN DIEGO, ÉTATS-UNIS.

MICROGENIMAGES/SPL/AFP

Le séchage des ongles par UV dégrade les cellules de la peau.

Une lentille intelligente traite le glaucome en temps réel



POSTECH

Le dispositif délivre un traitement dès que la tension de l'œil augmente.

OPHTALMOLOGIE Une étude sur la souris démontre pour la première fois qu'une lentille de contact intelligente est capable de mesurer la tension intraoculaire et d'administrer automatiquement une molécule thérapeutique lorsqu'elle augmente. Le dispositif ouvre la voie à un traitement en temps réel personnalisé du glaucome, deuxième cause de cécité dans le monde. **S. R.-M.**

SOURCE : TAE YEON KIM, UNIVERSITÉ TECHNOLOGIQUE DE POHANG, CORÉE DU SUD.

NICOLAS ATHIER

QUESTIONS À

Nicolas Authier

Professeur de pharmacologie et d'addictologie au CHU de Clermont-Ferrand

« Il y a peu d'études de qualité sur les effets du cannabis thérapeutique »

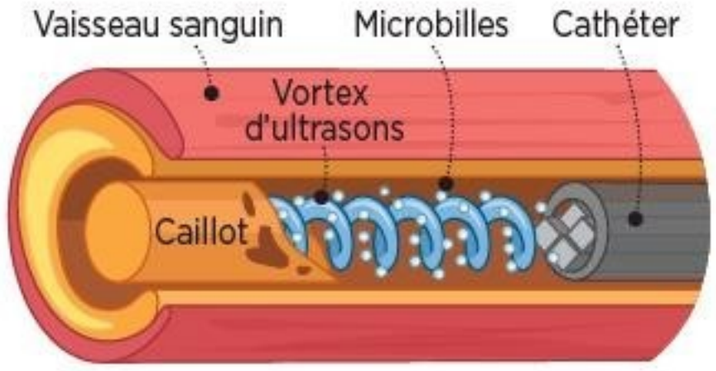
Alors qu'une étude suédoise met l'accent sur l'importance de l'effet placebo dans les essais du cannabis thérapeutique contre la douleur, le président du comité chargé de l'expérimentation des cannabinoïdes en France fait le point.

Que pensez-vous de cette étude concluant que le cannabis ne fait pas mieux que le placebo contre la douleur ?
L'article ne pose pas la bonne question et n'est donc pas pertinent. Les auteurs simplifient le produit et la maladie : il existe plusieurs types de médicaments à base de cannabis, en fonction de la forme pharmaceutique, du dosage de cannabidiol (CBD) ou de THC (molécule psychoactive), mais aussi plusieurs types de douleur chronique.

Dans quelles indications le cannabis thérapeutique a-t-il fait ses preuves ?
Principalement les douleurs neuropathiques, conséquence d'un dysfonctionnement ou d'une lésion des nerfs. Dans le cadre de l'expérimentation française, 2500 patients en ont bénéficié et les résultats montrent qu'environ 31 % des patients présentent une diminution d'au moins 30 % de l'intensité de leur douleur et que plus de 40 % rapportent une amélioration importante à très importante.

Que conseiller aux malades qui consomment ces produits de leur propre initiative ?
Mieux vaut qu'ils se rapprochent d'un professionnel de santé pour accompagner leur consommation, pour s'assurer qu'il n'y a pas d'interaction avec d'autres médicaments et en faire un meilleur usage possible. Consommer des substances actives n'est jamais anodin. ■

Propos recueillis par C. G.



BRUNO BOURGEOIS

En projetant les ondes ultrasonores en tourbillon, la sonothrombolyse se révèle plus rapide.

Détruire les caillots sanguins par vortex d'ultrasons

CHIRURGIE Alors que les ondes ultrasonores, parfois utilisées pour accélérer l'élimination d'un caillot sanguin obstruant l'artère, peinent à démontrer leur pertinence, une nouvelle technique pourrait changer la donne. Elle consiste à projeter les ultrasons en vortex, accompagnés de microbulles. *In vitro*, la technique s'est révélée plus rapide que celles existantes, selon les chercheurs. **H. J.**

SOURCE : BOHUA ZHANG, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE CAROLINE DU NORD, ÉTATS-UNIS.

Vexas, une nouvelle maladie qui inquiète

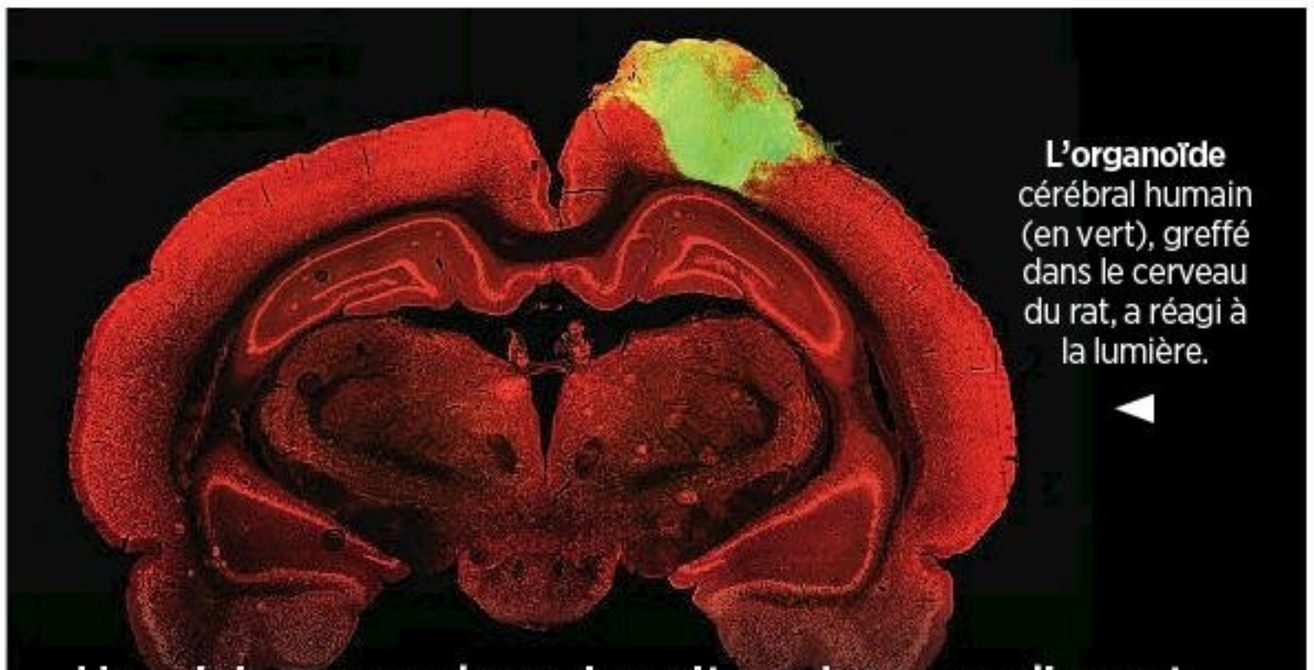
ÉPIDÉMIOLOGIE Décrit pour la première fois fin 2020, le syndrome Vexas toucherait un homme sur 4000 passé 50 ans, selon une étude épidémiologique menée sur cette maladie auto-inflammatoire due à des mutations du gène UBA1. Aux États-Unis, 15 000 personnes en souffriraient selon les auteurs qui alertent sur sa sévérité, caractérisée par des symptômes inflammatoires, rhumatologiques et hématologiques. **H. J.**

SOURCE : DAVID BECK, INSTITUTS AMÉRICAINS DE LA SANTÉ, ÉTATS-UNIS.

IL A DIT

« Dans notre étude, 90 % des symptômes persistants lors du Covid long étaient résolus à un an »

Dr Olivier Robineau, infectiologue au centre hospitalier de Tourcoing (Nord) et coordinateur de l'action Covid long de l'ANRS Maladies infectieuses émergentes, peu surpris d'une nouvelle publication montrant que la plupart des symptômes du Covid long disparaissent *« au cours de la première année »*.



L'organoïde cérébral humain (en vert), greffé dans le cerveau du rat, a réagi à la lumière. ◄

JGAMADZE ET AL

Un mini-cerveau humain voit par les yeux d'un rat

NEUROSCIENCES Un organoïde cérébral humain, cultivé en laboratoire puis implanté dans le cerveau d'un rat, a réagi à un stimulus extérieur. Un rayon de lumière projeté dans les yeux de l'animal a en effet activé des neurones dans l'organoïde humain greffé. Une nouvelle preuve *(lire* S. et A. *n° 910)* que des connexions de travail peuvent se nouer entre les cellules humaines et les circuits neuronaux de l'animal. **H. J.**

SOURCE : MADISON WILSON, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À SAN DIEGO, ÉTATS-UNIS.

presse citron

Meilleur antivirus

★★★★★

01NET

Suite hyper complète

★★★★

PC EDITORS' CHOICE

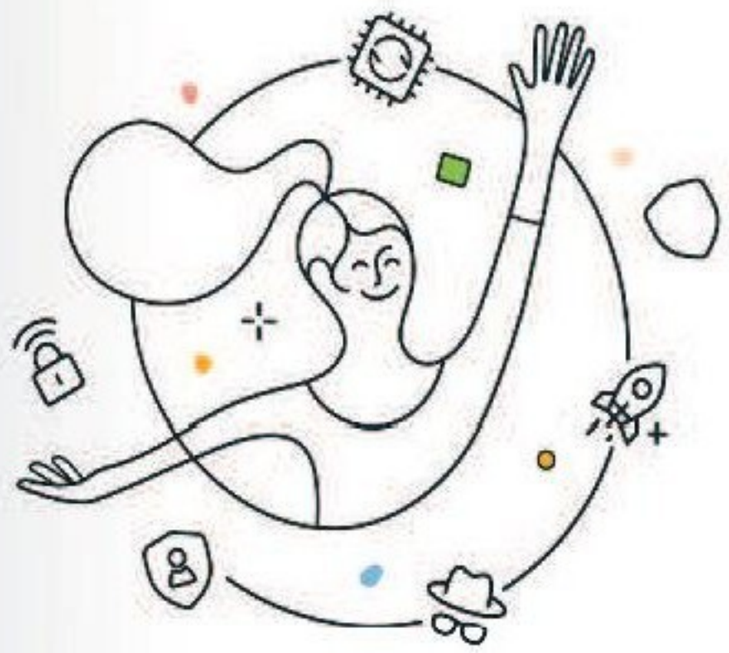
Choix de la rédaction

★★★★½

Avast

One

Protection proactive et puissante pour votre vie numérique



One

Téléchargez gratuitement sur avast.com/sciences

Bien plus qu'un simple antivirus

Avast One regroupe protection, confidentialité et performances.

N'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

Avast One

© 2022 Copyright Avast Software

BRIDGEMAN IMAGES

Les drakkars transportaient les chevaux des « Normands », leurs chiens et peut-être même leurs cochons.

Les Vikings voyageaient avec leurs animaux

Une étude menée dans l'unique cimetière viking connu au Royaume-Uni a révélé qu'ils naviguaient sur de longues distances avec leurs bêtes.

L'analyse de restes osseux provenant de sépultures vikings de la fin du IXe siècle dans le centre de l'Angleterre démontre pour la première fois que les Normands — ainsi nommés dans les sources écrites anciennes — venaient de Scandinavie avec leurs propres chevaux, leurs chiens et peut-être même leurs cochons, tous embarqués à bord de leurs drakkars. Dès le VIIIe siècle, les Vikings ont mené des raids réputés d'une extrême violence dans les îles Britanniques — l'actuel Royaume-Uni et l'Irlande. Au siècle suivant, ils eurent sur le territoire britannique de plus grandes aspirations que le simple pillage et cherchèrent à y implanter des colonies par la conquête de terres. Aussi était-il tenu pour acquis que les envahisseurs accaparaient en grande partie les animaux des villages britanniques pillés.

Le strontium prouve l'origine scandinave

Mais les morts du cimetière Heathwood Mound ont parlé. Seul lieu d'inhumation viking connu des îles Britanniques, il est associé à la Grande Armée païenne, venue du Danemark en 865 pour tenter de conquérir l'Angleterre et qui y hiverna entre 873 et 874. C'est ici que les restes de trois humains, d'un cheval, d'un chien et d'un probable cochon ont pu être exploités par des archéologues de l'université de Durham. Ils ont observé les rapports isotopiques du strontium, un élément chimique qui constitue une signature de l'environnement local d'un individu au moment de la formation de ses os. Les analyses ont montré que les trois animaux, tout comme l'un des individus, étaient originaires de Scandinavie et étaient morts peu de temps après leur arrivée. Il s'agit là de la toute première preuve scientifique solide que les Vikings embarquaient leurs propres animaux à bord de leurs navires, même pour de longues traversées sur la mer du Nord. Jusqu'à présent, seules des sources littéraires ou visuelles tendaient à l'indiquer. **M. B.**

Une jolie fleur dans une peau d'ambre rebaptisée

PALÉOBOTANIQUE

Exhumée en 1872 dans une forêt balte, la plus grande fleur préservée dans un bloc d'ambre jamais découverte a été rebaptisée. Les analyses poussées d'un grain de pollen extrait de l'enveloppe datée entre 38 et 34 millions d'années, révèlent que la fleur de 28 mm de large serait un proche parent de la famille asiatique des symplocacées comprenant plus de 300 espèces. Le fossile a donc été renommé *Symplocos kowalewskii*. **J. I.**

SOURCE : EVA-MARIA SADOWSKI, INSTITUT LEIBNIZ, BERLIN, ALLEMAGNE.

CAROLA RADKE, MFN

« Symplocos kowalewskii » mesure 28 mm de large.

IL A DIT

« Le sarcophage scellé depuis 4300 ans abritait une momie recouverte d'or, la plus ancienne jamais retrouvée »

Zahi Hawass, archéologue et ancien ministre des Antiquités égyptiennes, qui a dirigé les fouilles ayant abouti à la découverte de quatre tombes de dignitaires pharaoniques et d'une momie couverte d'or dans la nécropole de Saqqarah, dont les images n'ont toutefois pas encore été dévoilées.

LA CITÉ DE LA MER

CHERBOURG

UNE ÉMOTION **VIVANTE** DEPUIS 20 ANS

LE REDOUTABLE

TITANIC

ASGARD | www.asgard-media.fr

LE MONUMENT PRÉFÉRÉ DES FRANÇAIS 2022

CITEDELAMER.COM

Un précieux pendentif célèbre les noces d'Henri VIII

Ce bijou commémorant l'union du roi anglais avec Catherine d'Aragon en 1509 a été découvert dans un champ par un promeneur équipé d'un détecteur de métaux.

Le British Museum de Londres a dévoilé l'extraordinaire bijou découvert en 2019 près de Birmingham (Angleterre) par un patron de café alors qu'il se promenait dans un champ avec son détecteur de métaux. Orné de la rose Tudor et de grenades, symboles du roi d'Angleterre Henri VIII et de sa première épouse Catherine d'Aragon, le pendentif en or massif de 24 carats mesure 6 cm et pèse environ 300 grammes. Au dos, apparaissent les initiales H et K (Henry et Katherine en anglais) également en grenade. Il aurait été commandé par un membre de la haute noblesse en l'honneur du premier des six mariages d'Henri VIII, roi notamment connu pour avoir fait décapiter deux de ses épouses et ayant inspiré la légende de Barbe Bleue. Catherine d'Aragon, elle, sera simplement répudiée par le roi en 1533. **H. J.**

THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

Au dos du bijou figurent les lettres H et K (Henry et Katherine) et l'inscription « TOVS IORS » (pour toujours).

À VOIR SUR LE NET

KENZO TRIBOUILLARD / AFP

L'énigme des ossements de Waterloo

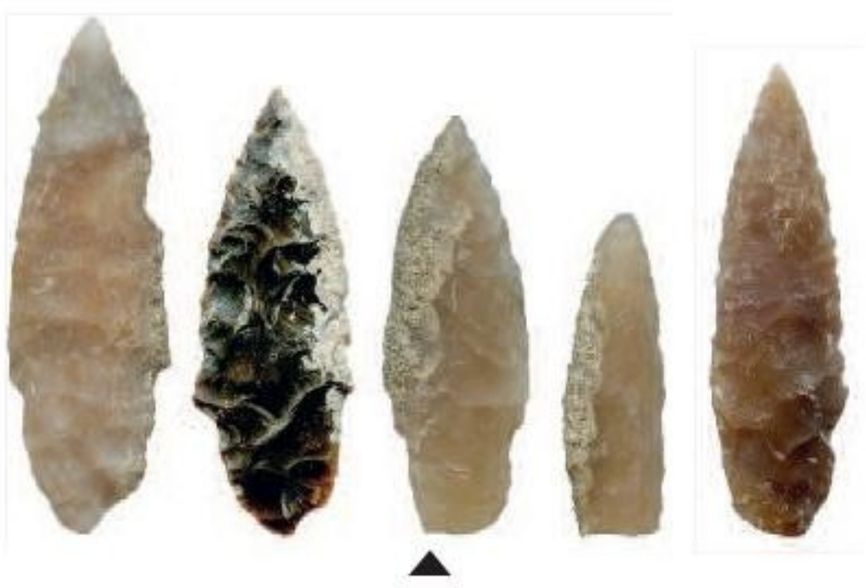
ARCHÉOLOGIE Plus de deux siècles après la défaite de Napoléon Ier à Waterloo, les ossements de soldats morts sur le champ de bataille ont rejoint l'Institut de médecine légale de Liège (Belgique) pour établir leur origine. Un défi de taille : une demi-douzaine de nationalités européennes ont pris part à la bataille qui fit 20 000 morts le 18 juin 1815. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Découverte des plus anciennes pointes de flèches américaines

ARCHÉOLOGIE Mises au jour dans l'Idaho (États-Unis) et datées d'environ -15 700 ans, ces pointes de projectiles d'un à cinq centimètres, encore aiguisées comme des rasoirs, sont plus anciennes de 3000 ans que toutes celles découvertes jusqu'ici sur le continent américain. Elles renforcent l'hypothèse de liens culturels précoces entre les peuples de l'ère glaciaire d'Asie du Nord-Est et d'Amérique du Nord. **M. B.**

SOURCE : LOREN DAVIS, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE L'OREGON, ÉTATS-UNIS.



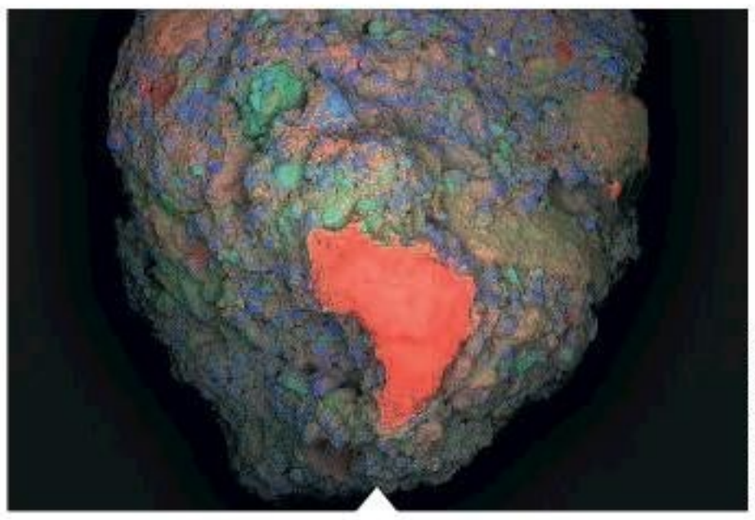
LOREN DAVIS

14 pointes ont été retrouvées au total.

Neandertal chassait bien l'éléphant géant

ANTHROPOLOGIE Selon de nouvelles analyses sur des os de pachydermes retrouvés en Allemagne, les néandertaliens chassaient bien les éléphants à défenses droites. L'espèce disparue, deux fois plus grosse que les éléphants d'Afrique actuels, pouvait mesurer 4 mètres de haut et peser 13 tonnes. Découper une telle proie avant que la viande ne pourrisse devait selon les chercheurs nécessiter des jours de travail pour une vingtaine d'hommes. **H. J.**

SOURCE : WIL ROEBROEKS, UNIVERSITÉ DE LEYDE, PAYS-BAS.



A. MASIC, L. SEYMOUR

La présence de calcium (en rouge) sur ce fragment de 2 cm permet au béton de réparer ses fissures.

Le béton romain s'autorépare

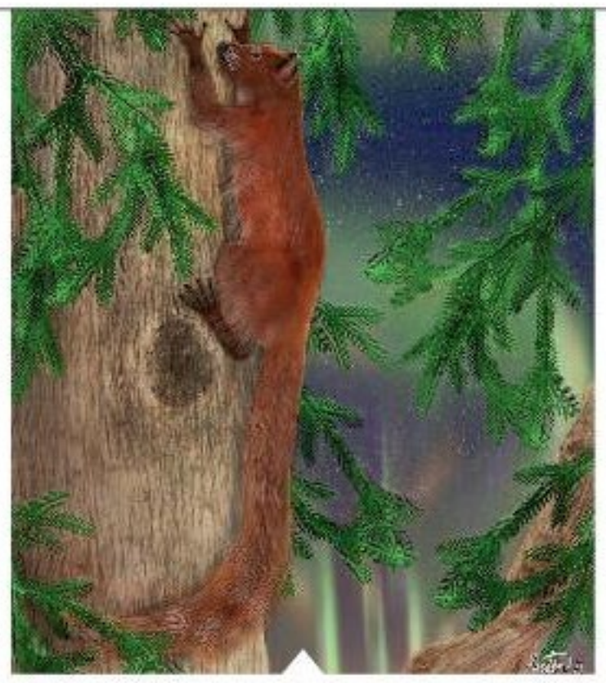
ARCHÉOLOGIE Si les constructions romaines ont traversé les siècles là où nos bétons contemporains se dégradent en quelques décennies, c'est que le béton romain était mélangé à de la chaux vive. Ainsi, lorsque des fissures apparaissent, l'eau de pluie entrant en contact avec le béton produit une solution saturée en calcium, qui recristallise ensuite et permet de combler les lézardes. **H. J.**

SOURCE : LINDA SEYMOUR, MIT, ÉTATS-UNIS

16 mètres

La longueur d'un papyrus complet découvert dans un sarcophage

ÉGYPTOLOGIE Comportant des extraits du *Livre des morts* — corpus de textes funéraires de l'Égypte antique —, le document, sans doute fabriqué vers 50 avant J.-C, se trouvait dans un sarcophage découvert en 2022 dans la nécropole de Saqqarah, a annoncé le Conseil suprême des antiquités égyptiennes. Il s'agit du premier papyrus complet retrouvé depuis un siècle. **M. B.**



K. MILLER, UNIVERSITY OF KANSAS

« Ignacius dawsonae » vivait dans l'Arctique (vue d'artiste).

Des primates arpentaient le cercle polaire

PALÉOCLIMATOLOGIE Des fragments de fossiles et de dents découverts sur l'île d'Ellesmere, dans l'extrême Nord canadien, ont permis d'identifier *Ignacius dawsonae* et *Ignacius mckennai*, deux petits primates aux faux airs d'écureuil. Ils ont été retrouvés dans des couches de sédiments du début de l'éocène (-56 à -33,9 millions d'années). **J. I.**

SOURCE : K. MILLER, UNIV. DU KANSAS, ÉTATS-UNIS.

Ce ptérosaure s'alimentait à la façon d'une baleine

PALÉONTOLOGIE Une nouvelle espèce de ptérosaures (des reptiles volants), découverte en Allemagne, a été baptisée *Balaenognathus maeuseri* (« bouche de baleine »). Le fossile, vieux de 150 millions d'années et extraordinairement conservé, dévoile de longues mâchoires équipées de 400 dents fines. Cet arrangement dentaire suggère qu'il se nourrissait comme les baleines à fanon qui filtrent l'eau pour récupérer de petits crustacés. **J. I.**

SOURCE : D. MARTILL, UNIV. DE PORTSMOUTH, ROYAUME-UNI.

D. M. MARTILL ET AL.

Doté de 400 fines dents (à droite), « Balaenognathus maeuseri » se nourrissait en filtrant l'eau.

B. GUÉNARD / BIOSPHOTO - G. TIMIN, M. MILINKOVITCH, UNIVERSITÉ DE GENÈVE - QUENTIN CHEVRIER - ANNA GIECCO

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

ANIMAUX

Un petit crustacé à la rescousse des eaux douces

Utilisée comme un canari dans une mine de charbon, une minuscule espèce de crustacé, la daphnie, pourrait servir de système d'alerte à la pollution dans les rivières et les cours d'eaux, même quand cette dernière est faible. À lire sur le site de *La Recherche*. **https://bit.ly/913daphnie**

RENDEZ-VOUS

Les podcasts de « Sciences et Avenir »

Retrouvez nos journalistes dans « Sixième Science », le podcast de vulgarisation scientifique réalisé en collaboration avec *20 Minutes*. **sciav.fr/913podcast**

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Au cœur microscopique du vivant

Découvrez les lauréats du concours de photomicrographie Nikon Small World qui met à l'honneur les plus belles images scientifiques réalisées en microscopie optique. **sciav.fr/913diapo**

5 minutes

L'Ircam rouvre sa salle modulable

Après sept ans de travaux, la salle configurable de l'Institut de recherche et coordination acoustique/musique, à Paris, a accueilli ses premiers concerts. Reportage. **sciav.fr/913ircam**

10 minutes

Des bijoux romains dans les canalisations

Au IIIe siècle, les baigneurs et baigneuses fréquentant le plus grand fort romain du mur d'Hadrien perdaient dans l'eau de minuscules pierres fines délicatement gravées : des intailles. **sciav.fr/913intailles**

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Comment fonctionne l'authentification à deux facteurs ?

Vous vous souvenez du temps où seul un mot de passe était nécessaire pour accéder à tous vos comptes ? Vous pourrez bientôt oublier cette époque, car l'authentification à deux facteurs est mise en place un peu partout pour bloquer les pirates et renforcer la sécurité des comptes en ligne. Découvrez comment fonctionne l'authentification à deux facteurs et à quoi elle sert.

Qu'est-ce que l'authentification à deux facteurs ?

L'authentification à deux facteurs, aussi appelée 2FA ou authentification à double facteur consiste à vous authentifier de deux façons différentes, ce qui offre une couche de sécurité supplémentaire dans le monde actuel où les données personnelles sont une cible très recherchée.

Pourquoi utiliser l'authentification à deux facteurs?

L'authentification à deux facteurs est nécessaire, car il s'agit d'un moyen plus efficace de contrôler l'accès à vos données personnelles que de les protéger à l'aide d'un simple mot de passe. Si quelqu'un pirate un compte protégé par une authentification à deux facteurs, il doit aussi connaître le deuxième facteur qui conditionne l'accès à ce compte, par exemple le code de vérification par SMS ou une empreinte digitale. Imaginez que quelqu'un puisse pirater votre compte Facebook simplement en devinant votre mot de passe.
Sans l'authentification à deux facteurs, le mot de passe est votre seule défense face aux pirates ou aux cybercriminels qui veulent revendre vos données personnelles sur le dark web. Alors pourquoi utiliser l'authentification à deux facteurs ? Même si cela prend un peu plus de temps que d'utiliser un simple mot de passe, il est bien pire de voir ses informations personnelles volées ou se retrouver victime d'un vol d'identité.

Comment fonctionne l'authentification à deux facteurs ?

L'identification à deux facteurs assure la sécurité des comptes en ayant recours à deux méthodes d'authentification non liées. La deuxième méthode d'authentification doit en général être validée par quelque chose que vous avez en votre possession, par exemple votre téléphone, en plus du nom d'utilisateur et du mot de passe.

Les trois facteurs qui peuvent être utilisés pour l'authentification à deux facteurs sont :

1- Une information que vous connaissez
C'est quelque chose que vous connaissez. Cet élément ne peut pas être perdu ni trouvé sous forme physique, mais il peut être copié ; il peut s'agir par exemple d'un mot de passe ou d'un code PIN.

2- Un objet que vous possédez
C'est quelque chose q*ui est en votre possession* et qui ne peut pas être facilement copié, comme une carte bancaire, une clé ou un téléphone.

3- Un élément (biométrique) qui vous caractérise
C'est ce que vous êtes et qui ne peut pas être facilement falsifié, comme

L'authentification à deux facteurs vérifie votre identité à l'aide de deux ou trois facteurs : quelque chose que vous savez (un code), quelque chose que vous possédez (une clé) et quelque chose qui vous caractérise (vos empreintes digitales).

votre empreinte digitale ou la forme de votre visage.

L'authentification à deux facteurs requiert deux de ces trois facteurs. L'authentification multifacteur peut les utiliser tous les trois, elle peut aussi par exemple utiliser le GPS pour confirmer que vous êtes bien là où vous prétendez être.

Voici quelques exemples courants d'authentification à deux facteurs :

- Retirer de l'argent à un distributeur automatique : vous *connaissez* votre code confidentiel, vous *êtes en possession* de votre carte bancaire.

- Accédez à un compte en ligne avec un code de vérification par SMS : vous *connaissez* votre nom d'utilisateur et votre mot de passe, vous *êtes en possession* de votre téléphone.

- Faire un voyage à l'étranger : vous *êtes en possession* de votre passeport, vous *êtes* qui vous prétendez être, par la vérification de la reconnaissance faciale, de vos empreintes ou de votre rétine.

Ces exemples montrent en quoi l'authen-tification à deux facteurs est nécessaire pour améliorer votre niveau de sécurité personnelle. Avec l'authentification à deux facteurs, le pirate peut installer un enregistreur de frappe pour copier votre mot de passe, mais il ne peut pas pirater votre compte sans avoir par exemple accès à votre téléphone (sur lequel est envoyé le code de vérification unique).

Les exigences de l'authentification à deux facteurs sont les mêmes quel que soit le contexte. C'est ce qui en fait un système si efficace. Les propriétés de base de l'authentification à deux facteurs ne changent pas et il est difficile d'avoir accès à plus d'un des facteurs en même temps, sauf bien entendu si vous êtes bien qui vous prétendez être.

L'authentification à deux facteurs est-elle sûre ?

Oui, l'authentification à deux facteurs est très sûre. Aucune méthode de connexion n'est totalement infaillible, mais l'authentification à deux facteurs vous protège mieux des fuites de données et des tentatives de piratage.

Pour savoir comment configurer l'authentification à deux facteurs, visiter ***avast.com/2FA***

Téléchargez **Avast One** gratuitement sur votre PC sur **avast.com/01net**

Avast One

Un antivirus gratuit primé et une solution de protection avancée

+ Des outils de nettoyage pour améliorer les performances

+ Un VPN pour plus de confidentialité

LE TOUT 100 % GRATUIT !

Et n'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

Fusion nucléaire

L'énergie du futur

Des chercheurs américains sont parvenus à fusionner des noyaux atomiques, produisant plus d'énergie qu'il n'en a fallu pour amorcer cette réaction. Une première étape vers des centrales plus puissantes que les réacteurs nucléaires actuels et sans les déchets ! La recherche n'a jamais été aussi foisonnante, pour la fusion par laser comme pour celle obtenue par confinement magnétique.

Dossier réalisé par
Franck Daninos et
Fabrice Nicot

DÉCRYPTAGE
Une percée historique dans la fusion par laser p. 30

ENTRETIEN
« Des lasers pour simuler les armes nucléaires » p. 34

REPORTAGE
Iter : les ambitions d'un réacteur expérimental p. 36

DÉVELOPPEMENT
Les start-up rivalisent d'ingéniosité p. 40

SHUTTERSTOCK

Une percée historique dans la fusion par laser

La preuve de principe est faite : maîtrisée dans un réacteur, la fusion nucléaire peut être une source d'énergie révolutionnaire pour l'humanité. Récit d'une aventure commencée au milieu du XXe siècle et qui pourrait aboutir au développement de puissants réacteurs ne produisant pas de déchets.

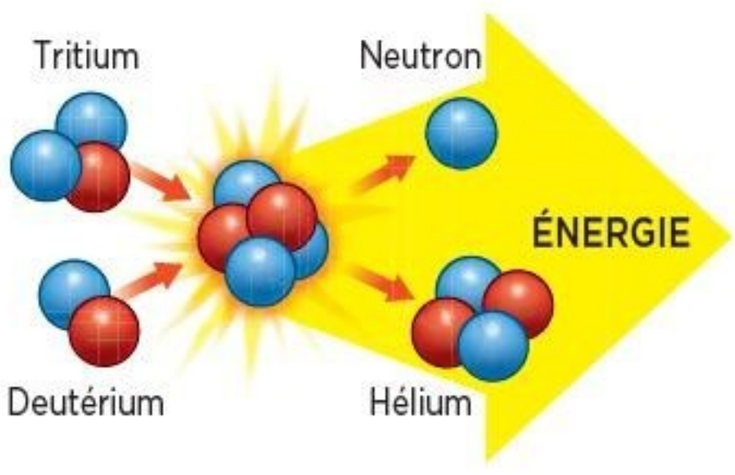
C'est une avancée majeure qui vient d'être réalisée par le National Ignition Facility (NIF) aux États-Unis, une installation grande comme trois terrains de football, qui abrite le laser le plus puissant au monde et aura coûté 3,5 milliards de dollars. Voilà soixante-dix ans en effet que la communauté scientifique cherchait à produire en laboratoire et de manière contrôlée l'« ignition par fusion », un phénomène qui se déroule aussi bien au cœur des étoiles que dans les armes thermonucléaires. Lors de l'ignition, des noyaux atomiques s'assemblent en libérant des quantités phénoménales d'énergie : suffisamment pour alimenter d'autres réactions de fusion et que celles-ci s'auto-entretiennent. Elles génèrent ainsi davantage d'énergie qu'elles n'en consomment. Et c'est ce graal que les 200 chercheurs du NIF ont réussi à atteindre le 5 décembre 2022 avec leur gigantesque laser.

Le résultat a été jugé si important qu'il a été dévoilé par la secrétaire américaine à l'Énergie Jennifer Granholm depuis Washington. Elle a salué un *« exploit historique »* qui permettra à la fois de renforcer la dissuasion nucléaire des États-Unis et de rapprocher l'humanité d'une nouvelle source d'énergie *« sûre, abondante et respectueuse de l'environnement »*. *« Même si le chemin reste long, les expériences du NIF marquent bel et bien un tournant »*, estime Greg de Temmerman, chercheur associé à Mines ParisTech et directeur général du think tank Zenon Research. Car *« elles prouvent que des réactions de fusion peuvent être utilisées pour fabriquer de l'énergie »*, s'enflamme Markus Roth de l'Institut de physique nucléaire de Darmstadt en Allemagne, qui compare les résultats du NIF aux premiers vols contrôlés et motorisés de l'histoire de l'aviation, au début du XXe siècle.

Seules les réactions de fission sont actuellement exploitées pour produire de l'énergie nucléaire. Elles consistent à scinder de gros noyaux atomiques — tel l'uranium — en deux fragments plus petits. C'est par ce mécanisme que les centrales nucléaires génèrent de l'électricité, mais occasionnent aussi

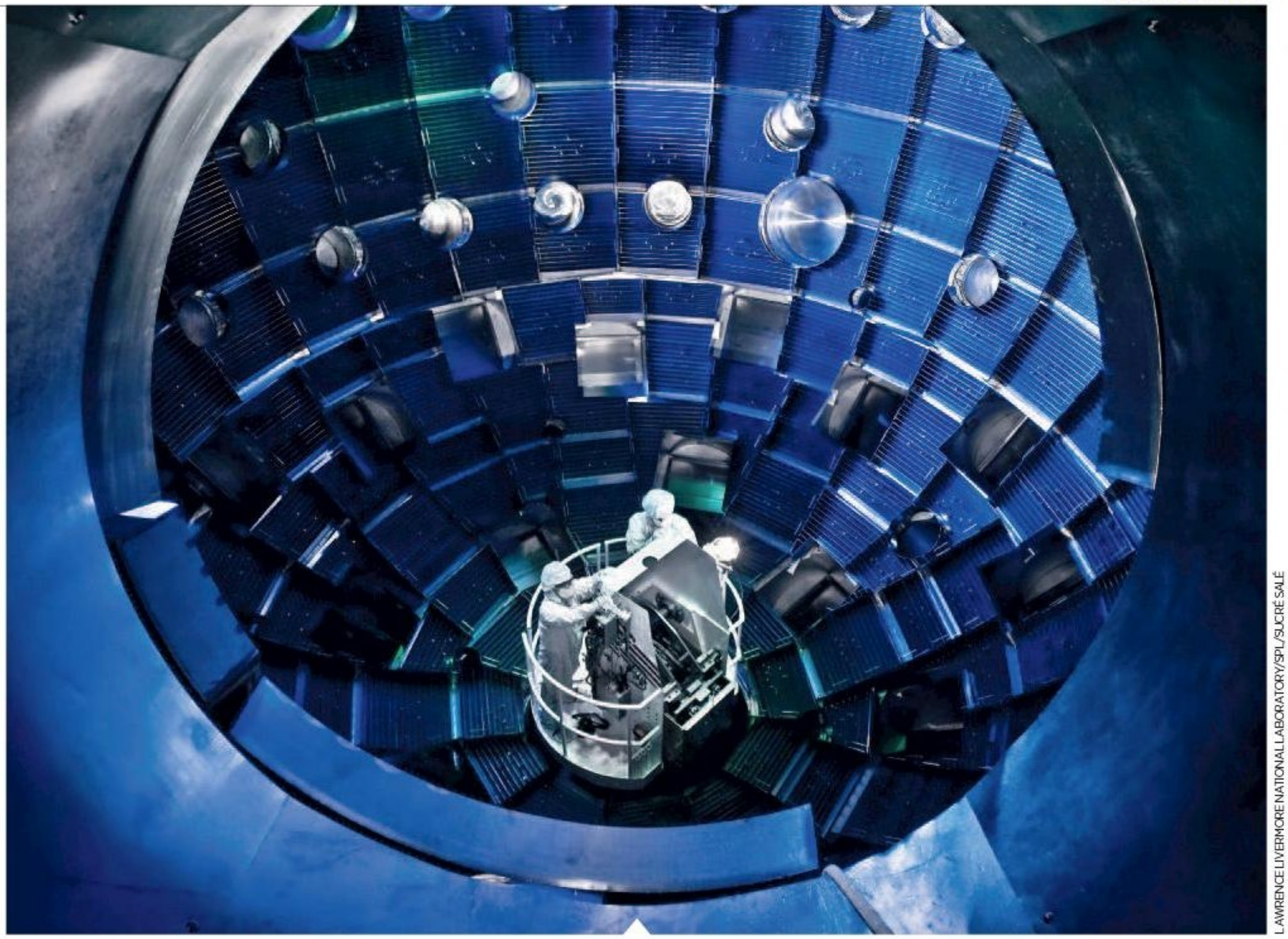
APPLICATION

Les avantages de la fusion



BRUNO BOURGEOIS

Les réactions de fusion entre des noyaux de tritium et de deutérium (deux isotopes de l'hydrogène) apporteraient d'immenses bénéfices si on parvenait à les maîtriser. Elles libèrent une énergie 10 millions de fois supérieure à celle d'une réaction chimique telle que la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz, et quatre fois plus que les réactions de fission nucléaire. Contrairement à celles-ci, elles n'engendrent pas de déchets radioactifs de haute activité à vie longue et ne présentent aucun risque d'emballement. Elles ne libèrent aucun gaz à effet de serre ; et le combustible pourrait être directement fabriqué par des centrales à fusion.



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY/SPL/SUCRÉ SALÉ

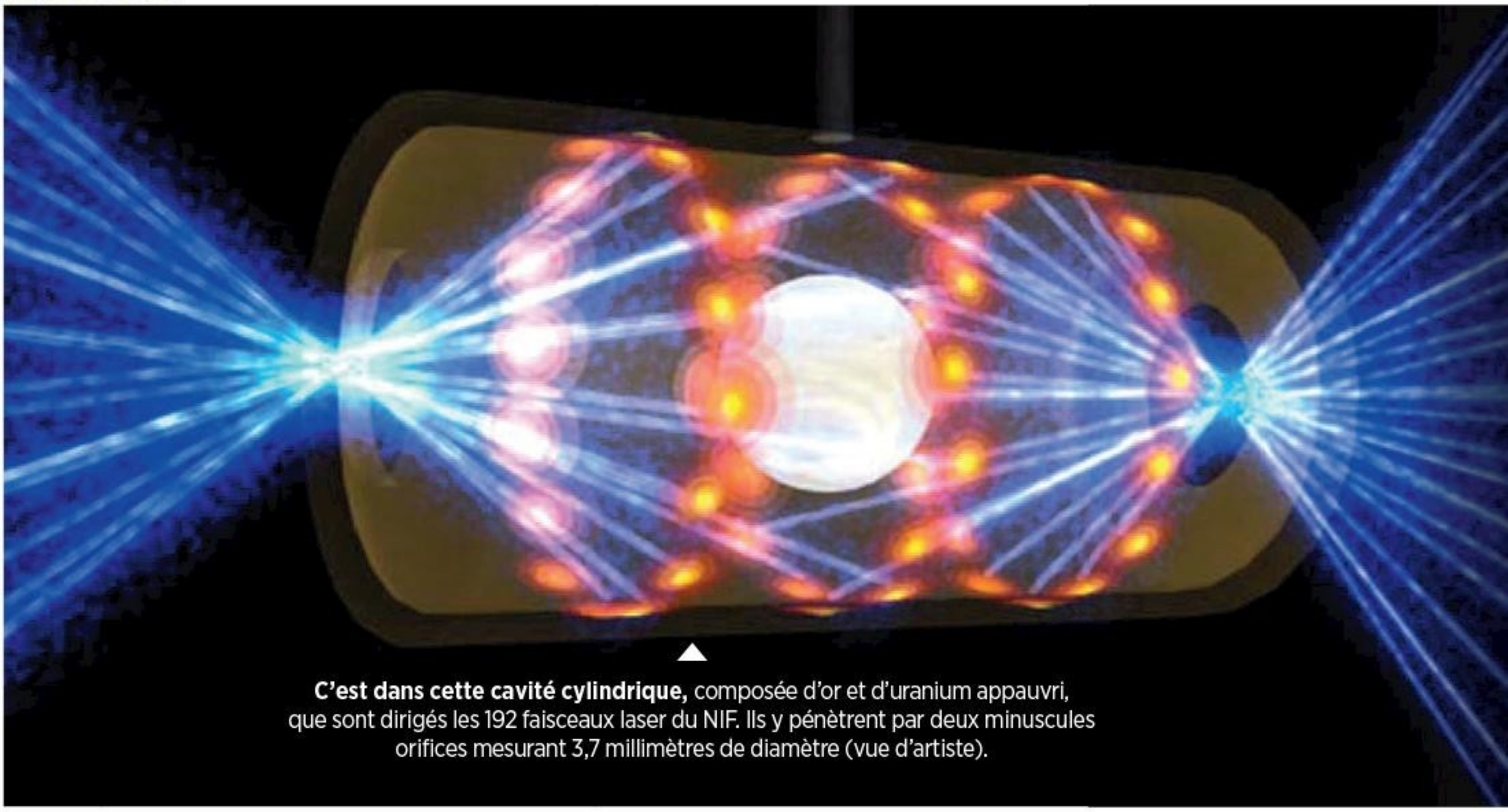
La chambre d'expériences du National Ignition Facility (NIF), au laboratoire national Lawrence-Livermore (États-Unis), abrite les réactions de fusion et des dizaines d'instruments de mesure.

des déchets hautement radioactifs. La fusion met en œuvre le processus inverse. Des noyaux légers comme l'hydrogène et ses différents isotopes (le tritium et le deutérium en particulier, qui possèdent les mêmes propriétés chimiques mais une masse légèrement différente) s'assemblent pour former un élément plus lourd, en l'occurrence un noyau d'hélium, ainsi qu'un neutron très énergétique. Ce sont des réactions de ce type qui alimentent et font briller le Soleil, lequel fusionne 620 millions de tonnes d'hydrogène chaque seconde. L'astrophysicien anglais Arthur Eddington a été le premier, en 1920, à en suggérer l'existence. Et à envisager que l'humanité puisse utiliser ces réactions *« à ses propres fins et disposer d'une source inépuisable d'énergie »* si elles étaient un jour maîtrisées. Un rêve ô combien difficile à concrétiser ! Car les noyaux atomiques n'ont aucune disposition naturelle à s'assembler. Dotés d'une charge électrique positive, ils tendent plutôt à se repousser les uns les autres en raison des interactions électrostatiques. Pour permettre ce mariage forcé, des conditions aussi extrêmes que particulières se révèlent ainsi nécessaires. Elles sont atteintes dans les régions centrales du Soleil, où l'attraction gravitationnelle de l'astre confine les particules en les empêchant de se disperser. La température dépasse en outre 10 millions de degrés. La matière se trouve alors totalement ionisée, formant une soupe de noyaux atomiques et d'électrons que les physiciens appellent un plasma. Or, dans pareille fournaise, l'agitation thermique est si importante qu'elle permet à des myriades de noyaux d'entrer en

E.GARAULT/PASCO

« Même si le chemin reste long, les expériences du NIF marquent bel et bien un tournant »

Greg de Temmerman, chercheur associé à Mines ParisTech et directeur général de Zenon Research



C'est dans cette cavité cylindrique, composée d'or et d'uranium appauvri, que sont dirigés les 192 faisceaux laser du NIF. Ils y pénètrent par deux minuscules orifices mesurant 3,7 millimètres de diamètre (vue d'artiste).

collision et finalement de s'assembler. *« Les travaux visant à utiliser la fusion comme une source d'énergie ont débuté au milieu du xxe siècle,* rappelle Greg de Temmerman, *parallèlement aux programmes militaires américains et soviétiques qui font exploser les premières armes thermonucléaires, en 1952 et 1953 respectivement.* » Dénommées aussi bombes H, ces dernières contiennent un détonateur à fission qui, en explosant, comprime très fortement un combustible d'hydrogène et élève la température à 100 millions de degrés. De quoi déclencher des réactions de fusion et libérer une énergie 1000 fois plus importante qu'avec les bombes à fission ayant anéanti les villes japonaises de Hiroshima et de Nagasaki en 1945. Comment la domestiquer pour des applications civiles et industrielles ? *« C'est une immense gageure,* souligne Greg de Temmerman, *sachant que la fusion nécessite des conditions extrêmes et ne sera profitable que si elle libère davantage d'énergie qu'il n'en faut pour la provoquer.* » Une technique se développe dans les années 1950. Elle consiste à chauffer et faire fusionner un plasma par des rayonnements micro-ondes, tout en le confinant avec de puissants champs magnétiques. La plupart des réacteurs conçus à cet effet sont appelés tokamaks. Plus de 200 ont été érigés à ce jour, le plus ambitieux — Iter — étant en construction dans le sud-est de la France *(lire le reportage p. 36)*.

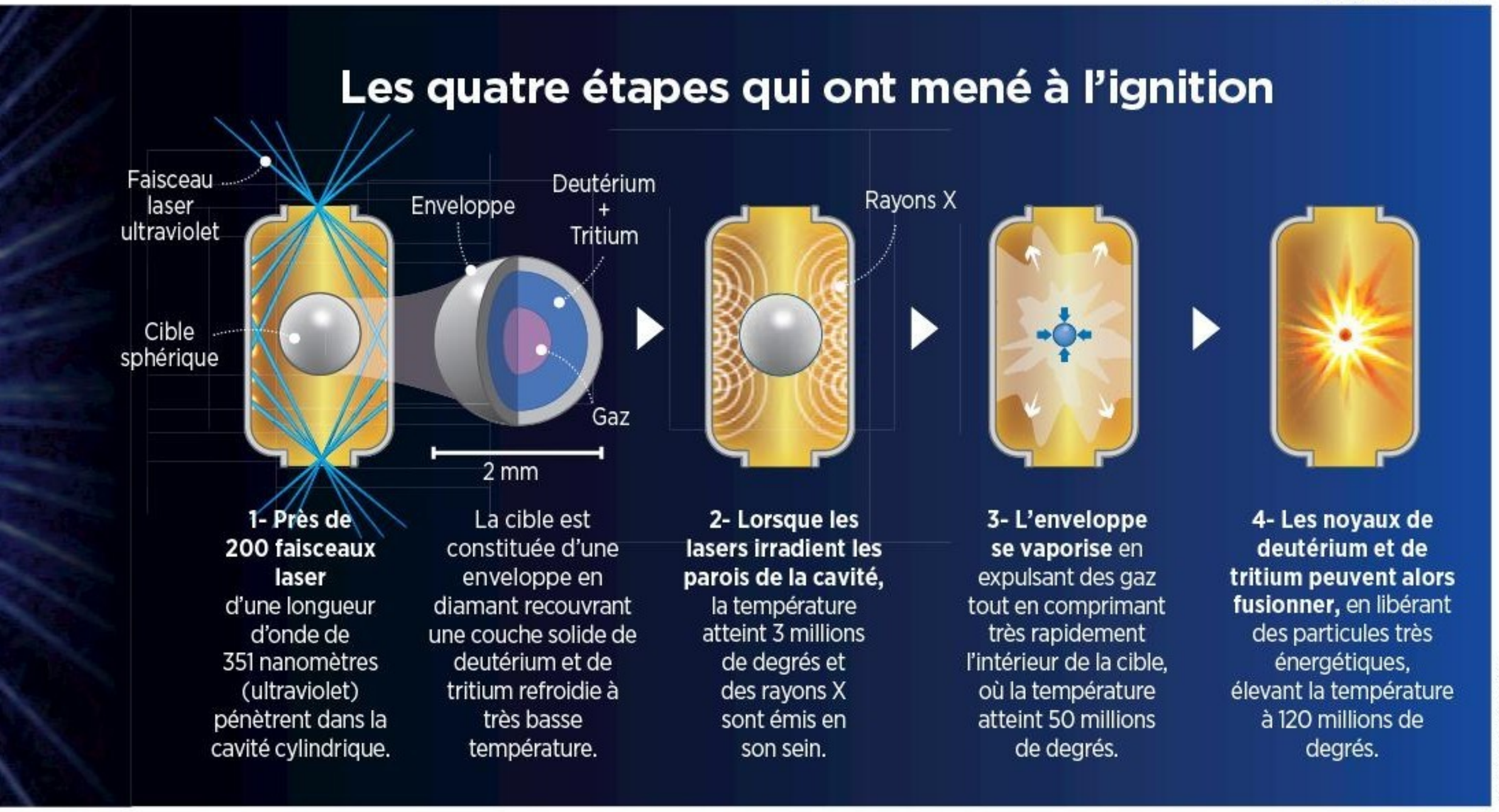
Un laboratoire impliqué dans le développement de la bombe H

Une autre stratégie est présentée en 1972 par John Nuckolls, physicien au Laboratoire national Lawrence-Livermore (LLNL) en Californie (États-Unis), très impliqué dans le développement des bombes H américaines. Son idée : utiliser la technologie des lasers, inventée une dizaine d'années auparavant, pour allumer un plasma d'hydrogène à de toutes petites échelles d'espace et de temps. L'énergie concentrée dans des impulsions lumineuses chaufferait intensément, en effet, de minuscules capsules recelant un combustible fusible. Leurs enveloppes externes seraient alors aussitôt vaporisées, *« ce qui expulserait des gaz autour des capsules tout en comprimant très violemment leurs régions internes — un peu comme dans les tuyères d'une fusée »*, indique Dimitri Batani, chercheur au Centre lasers intenses et applications de l'université de Bordeaux. Or, cette implosion extrêmement rapide pourrait engendrer des niveaux de pression et de température plus importants qu'au cœur du Soleil, déclenchant ainsi

KATARZYNA BATANI

« Une fois que certains seuils sont franchis, les effets de la fusion nucléaire deviennent aussi rapides que spectaculaires »

Dimitri Batani, chercheur au Centre lasers intenses et applications de l'université de Bordeaux



des réactions de fusion. Maintenues uniquement par les forces de compression et l'inertie du système, elles ne dureraient toutefois qu'un très court laps de temps.

Mais alors que John Nuckolls imagine que des lasers d'une énergie de plusieurs milliers de joules permettraient d'amorcer la fusion et même d'atteindre l'ignition, ceux-ci vont se révéler nettement insuffisants. Des lasers hors norme — des centaines voire des milliers de fois plus énergétiques — seront de fait nécessaires. Et c'est pour les besoins d'institutions militaires que de telles machines seront en premier lieu financées et construites, en raison du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires signé à l'ONU en 1996. Objectif : *« Réaliser des expériences de fusion associées à de puissants moyens de calcul, afin de garantir la fiabilité des têtes nucléaires uniquement par des simulations numériques »*, explique Greg de Temmerman. Les plus puissants instruments de ce type se trouvent aux États-Unis et en France. Côté américain, il s'agit donc du NIF, implanté au LLNL ; et pour la France du Laser Mégajoule (LMJ), géré par la direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique et des énergies renouvelables (CEA), à 30 kilomètres de Bordeaux.

« Ces installations se ressemblent beaucoup », note Erik Lefebvre, qui pilote les expériences laser-plasma au LMJ. Elles visent, toutes deux, à faire converger près de 200 faisceaux de très haute puissance vers un cylindre en or de la taille d'un dé à coudre. Cette cavité émet alors des rayons X en son sein, qui servent eux-mêmes à chauffer et faire imploser des capsules sphériques contenant des isotopes de l'hydrogène *(voir l'infographie ci-dessus)*. Si le fonctionnement du NIF et du LMJ est très similaire, les Américains ont bénéficié de moyens plus importants et progressé plus vite. Leur objectif, en outre, était d'achever la machine avant de démarrer les expériences, alors que le LMJ monte peu à peu en régime en alternant prises de données et phases d'assemblage. Il ne sera ainsi pleinement opérationnel qu'en 2026 *(lire l'interview p. 34)*, le NIF ayant pu l'être dès 2009.

400 km/s
La vitesse à laquelle les noyaux d'hydrogène sont comprimés et fusionnent.

Les chercheurs ont dû progresser empiriquement

« Au départ très optimistes, les Américains pensaient atteindre l'ignition en deux ou trois ans », signale Erik Lefebvre. Mais le chemin s'est révélé bien plus long et laborieux. *« Les prédictions théoriques qui déterminaient les paramètres expérimentaux et devaient nous guider vers l'ignition étaient beaucoup trop imprécises »*, lâche Sébastien Le Pape, qui a participé aux expériences du NIF de 2009 à 2019 avant de rejoindre le Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses à Palaiseau. Les chercheurs ont dû progresser ainsi empiriquement. *« Avec souvent le sentiment d'être au milieu de la nuit,* se remémore Sébastien Le Pape. *À l'issue d'un tir de laser, nous étions totalement déçus trois fois sur cinq, mais les autres fois nous faisions un pas dans la bonne direction. »*

La première difficulté concernait la géométrie des implosions. Celles-ci ▶

CADAM/CEA

ENTRETIEN

DANIEL VANDERHAEGEN

DIRECTEUR DU PROGRAMME SIMULATION DE LA DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES DU CEA

« Des expériences de fusion par laser pour simuler les armes nucléaires »

Comment les expériences du National Ignition Facility (NIF) aux États-Unis et du Laser Mégajoule (LMJ) en France sont-elles exploitées par les militaires ?
Depuis l'arrêt des essais nucléaires en 1996, les États-Unis et la France recourent à des simulations informatiques pour garantir la fiabilité de leur arsenal et développer de nouveaux systèmes d'armes. Elles sont fondées sur un enchaînement d'équations qui modélisent la physique du fonctionnement d'une tête thermonucléaire — ce que nous appelons des codes de simulation. Et c'est pour améliorer, en permanence, la précision de ces codes que le NIF et le LMJ réalisent des expériences de fusion par laser, à des échelles bien plus réduites que lors d'une explosion nucléaire, mais les plus représentatives possible.

Ces simulations nécessitent-elles de puissants moyens de calcul ?
Les équations qui décrivent les écoulements d'un plasma en fusion ou le comportement de matériaux soumis à des pressions de plusieurs milliards d'atmosphères sont extrêmement complexes. Pour les résoudre, nous utilisons des supercalculateurs parmi les plus performants au monde. En particulier, la machine Exa1, qui possède une puissance de calcul de 36 pétaflops [36 millions de milliards d'opérations par seconde] et près de 900 000 cœurs de processeurs, inaugurée en 2022 par le ministre des Armées.

Le LMJ pourra-t-il atteindre, comme le NIF, le seuil d'ignition ?
Nous réalisons des études sur la physique des hautes densités d'énergie depuis 2014 et des expériences de fusion nucléaire depuis 2019. Quatre-vingts faisceaux laser sont actuellement utilisés, huit de plus le seront d'ici quelques mois, pour délivrer une énergie de 350 kilojoules. Lorsque les 176 faisceaux seront finalement installés en 2026, celle-ci atteindra 1,3 mégajoule. Nous commencerons en 2030 une montée progressive vers le seuil d'ignition et la fusion auto-entretenue. Plus on tend vers ce régime, plus on se rapproche des phénomènes de combustion à l'œuvre dans une bombe H. ■

Propos recueillis par F. D.

n'étaient pas parfaitement symétriques, ce qui occasionnait des pertes d'énergie, mais le problème a pu être résolu en modulant les propriétés des lasers. Les implosions suscitaient également des instabilités hydrodynamiques *« qui croissaient trop vite et injectaient du matériel froid au sein du plasma »*, détaille le chercheur. Là encore, c'est en ajustant les caractéristiques des faisceaux que la difficulté a été surmontée, entre 2013 et 2016. Puis une étape cruciale a été franchie lorsque le NIF a modifié l'enveloppe des capsules, en utilisant non plus des polymères mais un mélange trois fois plus dense de diamant et de tungstène. La durée des impulsions a pu être abaissée ainsi de 21 à 8 milliardièmes de seconde, en concentrant davantage encore l'énergie des faisceaux.

Une température portée à 120 millions de degrés

Tous ces efforts ont fini par payer. En août 2021, le NIF réalisait un tir extrêmement précis de 1,92 million de joules (mégajoules). *« Pendant un bref instant, l'accroissement de température produit par les réactions de fusion était alors plus rapide que les pertes causées par les processus de rayonnement et de conduction thermique »*, indique Erik Lefebvre. L'énergie dégagée par les neutrons atteignait 1,37 mégajoule, soit un « gain » de 0,71. C'était certes légèrement mieux que le record (0,67) détenu depuis 1977 par le tokamak britannique JET (Joint European Torus). Mais il restait à démontrer, pour le NIF, qu'un gain supérieur à 1 était atteignable. Et ce jalon a pu être dépassé en décembre 2022, en augmentant de 8 % l'énergie des lasers. Portée à 2,05 mégajoules, elle a déclenché suffisamment de réactions de fusion pour élever la température à 120 millions de degrés et libérer 3,15 mégajoules. Soit un gain de 1,53 : jackpot ! *« La fusion nucléaire ressemble un peu à une avalanche,* juge Dimitri Batani. *Il est très difficile de la faire démarrer, mais une fois que certains seuils*

sont franchis, les effets deviennent aussi rapides que spectaculaires. » En poussant leur machine au maximum de ses capacités, le NIF espère produire ainsi 5 mégajoules d'énergie d'ici à trois ans, puis 10 mégajoules en 2028.

Reste à faire sauter quelques verrous technologiques

Le bilan global restera toutefois encore largement déficitaire… car les lasers du NIF engloutissent eux-mêmes 322 mégajoules d'électricité pour fonctionner! Sans compter qu'une centrale à fusion nécessiterait des gains supérieurs à 100 pour produire de l'électricité à un coût acceptable, selon les calculs des physiciens. Et au moins dix tirs lasers par seconde, alors que le NIF n'en effectue au maximum que trois par jour. « *Cette installation a certes été conçue pour les besoins de l'armée américaine,* insiste Greg de Temmerman. *Pas pour produire de l'énergie.* » Même si l'ignition constitue à cette fin une étape indispensable, elle est donc loin d'être suffisante, de nombreux verrous technologiques devant encore être levés. L'une des clés consistera à apprendre à se passer de la cavité produisant des rayons X. « *Ce dispositif a été choisi par le NIF et le LMJ car il se rapproche du fonctionnement des bombes H et que les instabilités hydrodynamiques sont plus facilement contrôlables* », précise Dimitri Batani. Mais la conversion de l'énergie laser en rayons X entraîne d'énormes déperditions, de plus de 80 %. « *Une centrale à fusion devra donc nécessairement irradier les cibles de manière directe* », affirme l'expert, une technique expérimentée en particulier par le laser Omega de l'université de Rochester, dans l'État de New York.

ELI

Une nouvelle génération de lasers permet d'atteindre une fréquence de tirs de un par minute (ici, l'Aton d'Extreme Light Infrastructure, en République tchèque).

Les nouvelles technologies laser permettront d'accroître également la fréquence et la puissance des tirs. Conçus dans les années 1990, les instruments du NIF produisent des faisceaux lumineux d'une longueur d'onde bien précise avec un rendement énergétique de seulement 0,5 %. Or, les lasers développés ces dernières années à l'aide de diodes le font désormais avec une efficacité de 10 % — jusqu'à 20 % en théorie — tout en augmentant la cadence de tirs à un par minute. Tel est le cas, par exemple, du laser Aton du programme européen Extreme Light Infrastructure, installé depuis 2019 en République tchèque. Et c'est avec cette nouvelle classe de lasers que la start-up germano-américaine Focused Energy entend construire des réacteurs à fusion de plus en plus performants jusqu'au stade industriel. « *Nous comptons fabriquer un premier prototype en 2026, obtenir un gain de 30 en 2029, puis effectuer dix tirs par seconde en 2037 avec une machine commerciale baptisée Quasar* », annonce ainsi Markus Roth, directeur scientifique de cette entreprise fondée en 2021 avec d'anciens chercheurs du LLNL. « *On peut avoir des doutes sur les calendriers communiqués par les nombreuses start-up qui se créent actuellement dans le domaine de la fusion* », tempère Erik Lefebvre. Mais il est clair que celui-ci bénéficie d'un fort engouement — aussi bien pour la fusion par laser qu'avec des tokamaks — qui n'existait pas il y a dix ans. « *Les crises climatique et énergétique sont certes passées par là* », observe Erik Lefebvre. Et les avancées scientifiques sont réelles. La percée du NIF galvanise ainsi l'ensemble du secteur, où les financements et nouveaux projets affluent afin de concrétiser le rêve d'Eddington. ■

Franck Daninos @fdaninos

RECHERCHE

L'espoir d'une filière sans déchets

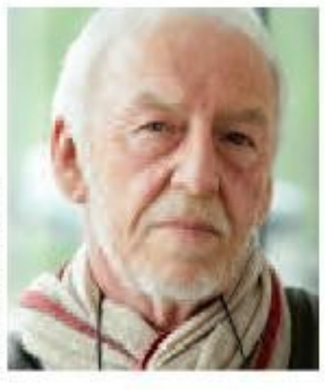
D'autres atomes que l'hydrogène pourraient être utilisés dans des réacteurs à fusion. Les recherches se concentrent, en particulier, sur les réactions entre l'hydrogène et le bore — élément aussi inoffensif qu'abondant. Elles ne génèrent que des noyaux d'hélium et pas de neutrons, donc aucun déchet nucléaire activé par ceux-ci. Le problème, c'est qu'elles nécessitent des températures dix fois plus élevées qu'avec des atomes d'hydrogène… soit près d'un milliard de degrés ! Des start-up comme l'allemande Marvel Fusion ou l'australienne HB11 Energy développent toutefois des procédés qui permettraient de s'en abstraire grâce à des impulsions laser ultracourtes.

Iter : le long chemin vers la fusion

La plus grande installation au monde destinée à étudier la fusion nucléaire par confinement magnétique est en construction dans le sud de la France. Iter devrait démontrer vers 2035 la possibilité de fabriquer de l'électricité à partir de ce procédé. Mais le chantier avance plus lentement que prévu. Reportage.

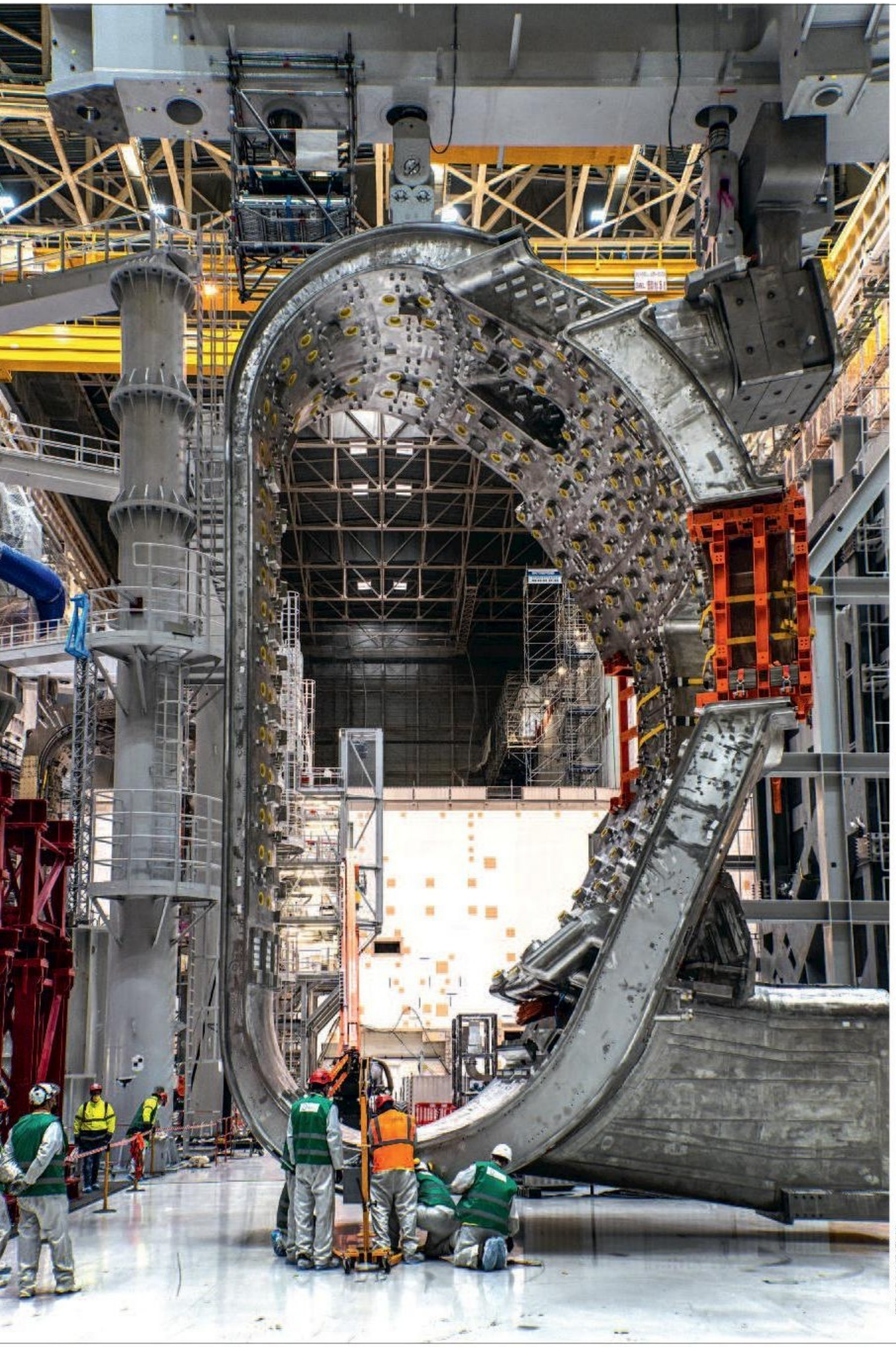
À une quarantaine de kilomètres au nord d'Aix-en-Provence, en lisière du site CEA de Cadarache (Bouches-du-Rhône), le chantier d'Iter (International thermonuclear experimental reactor) nous écrase par son gigantisme. Il s'étend sur 180 hectares, soit environ 250 terrains de football. 2500 personnes y travaillent chaque jour. Il comptera en tout 39 édifices dont le saint des saints, le bâtiment du réacteur de fusion nucléaire : 120 mètres de long, 80 de large, et 80 de haut. On y ferait tenir Notre-Dame de Paris sans problème. Terminé en 2020, il abrite désormais le tokamak (acronyme russe de « chambre toroïdale avec bobines magnétiques »), en cours d'assemblage. Dans ce tore de 1400 m³ se dérouleront les réactions de fusion entre noyaux de deutérium et de tritium *(lire p. 30)*, au sein d'un plasma de 840 m³ porté à 150 millions de degrés, dix fois la température au cœur du Soleil. Il sera confiné par un ensemble complexe de champs magnétiques générés notamment par 18 bobines supraconductrices de 310 tonnes chacune, refroidies à -269 °C. Les températures les plus extrêmes de l'Univers seront donc réunies ici, au bord de la Durance, pour une ambition prométhéenne : maîtriser le feu des étoiles et démontrer que l'on pourra en faire, un jour lointain, de l'électricité…

Lorsque nous visitons le chantier, étrangement calme et silencieux, les nouvelles sont mauvaises. L'année 2022 a été marquée par la révélation de plusieurs défauts dans les pièces du tokamak. La chambre à vide est assemblée par segments qui sont soudés en secteurs, comme les quartiers d'une orange. Or, les trois secteurs livrés par la Corée du Sud présentent une déformation qui les empêche d'être à leur tour soudés ensemble. Autre souci : des fissures de 2,2 millimètres sont apparues dans les tubulures de l'écran thermique du tore. Ces anomalies vont entraîner le démontage d'une partie du tokamak, et « *un retard significatif* », sans plus de précision, de l'aveu même de Pietro Barabaschi, le directeur général d'Iter. Quant à la facture, estimée désormais à 20 milliards d'euros, elle a déjà triplé par rapport à l'enveloppe initiale. Pas de quoi décourager les équipes, si l'on en croit Robert Arnoux, chargé de communication depuis les débuts du projet. « *Iter est unique au monde, jamais une installation de fusion n'avait été réalisée à cette échelle. C'est donc un programme expérimental, en même temps qu'un chantier industriel inédit. Compte tenu de la dimension et de la complexité des pièces, nous sommes forcément confrontés à des difficultés de fabrication. Notre force, c'est notre capacité à réagir. Les machines du chantier sont faites pour assembler des pièces, nous les utilisons aujourd'hui pour "désassembler", puisqu'il faut ressortir* ▸


ITER ORGANIZATION

« Nous réorganisons le chantier de façon à mener en parallèle les réparations et le montage du reste du tokamak »

Robert Arnoux, chargé de communication du projet Iter



ITER ORGANIZATION

◄ **Ce segment constitue la première portion** de la chambre à vide d'Iter, où auront lieu les réactions de fusion. Il pèse à lui seul 440 tonnes.

ITER EN CHIFFRES

150 millions de degrés
La température du plasma.

-269 °C
La température des bobines supraconductrices.

11,8 teslas
L'intensité du champ magnétique généré par les bobines pour confiner le plasma (c'est 200 000 fois le champ magnétique terrestre).

COOPÉRATION

Une organisation intergouvernementale

En 1985, le secrétaire général du Parti communiste de l'Union soviétique Mikhaïl Gorbatchev propose au président américain Ronald Reagan une collaboration internationale pour la recherche pacifique sur la fusion. C'est la naissance d'Iter. La France de François Mitterrand rejoindra rapidement le projet, avec le Japon. Aujourd'hui, l'organisation intergouvernementale regroupe sept membres: la Chine, la Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom), l'Inde, le Japon, la Corée du Sud, la Fédération de Russie et les États-Unis. La coopération scientifique s'étend en tout à 35 pays. Pas étonnant donc qu'une trentaine de langues différentes soient parlées sur le site de Cadarache. Les contrats sont régis par le droit international selon des accords propres à Iter, comme pour l'ONU, l'OMS, l'Unesco… Chacun est là pour cinq ans, renouvelables, dans un management à l'anglo-saxonne. Les sept membres partagent le coût de la construction, de l'exploitation et du démantèlement de l'installation.

AFP

Mikhaïl Gorbachev et Ronald Reagan décident, lors d'un sommet en 1985 à Genève, de fonder le programme Iter.

La contribution se fait à 90 % en nature, chacun construisant des pièces de ce gigantesque mécano. La France a fourni de surcroît le site en 2005, à l'issue d'un long feuilleton politico-scientifique l'opposant au Japon. Les membres disposent d'un représentant au conseil de gouvernance et gèrent collégialement l'organisation. Le conflit en Ukraine n'a rien changé. La Russie ne s'est pas retirée de la collaboration et devrait continuer d'acheminer des pièces comme convenu.

une partie de la chambre à vide. Et nous réorganisons le chantier de manière à mener en parallèle ces réparations et le montage du reste du tokamak, dont 85 % des pièces sont déjà fabriquées. »

Même ciel serein à l'écart du chantier, dans les élégants bureaux de l'organisation, où s'affaire Alberto Loarte, chef de la division scientifique d'Iter. À quoi s'occupe ce physicien sur une machine qui n'existe pas encore ? La question le fait sourire. « *Il y a de quoi faire ! Notre objectif est connu : générer 500 mégawatts de puissance de fusion dans un plasma deutérium-tritium auto-entretenu. Mais le chemin* [*iter* en latin] *optimal pour y parvenir reste à définir. Et pour cela, nous sommes amenés à faire évoluer les caractéristiques d'Iter, qui ne sont pas figées, contrairement à ce que l'on pourrait imaginer.* »

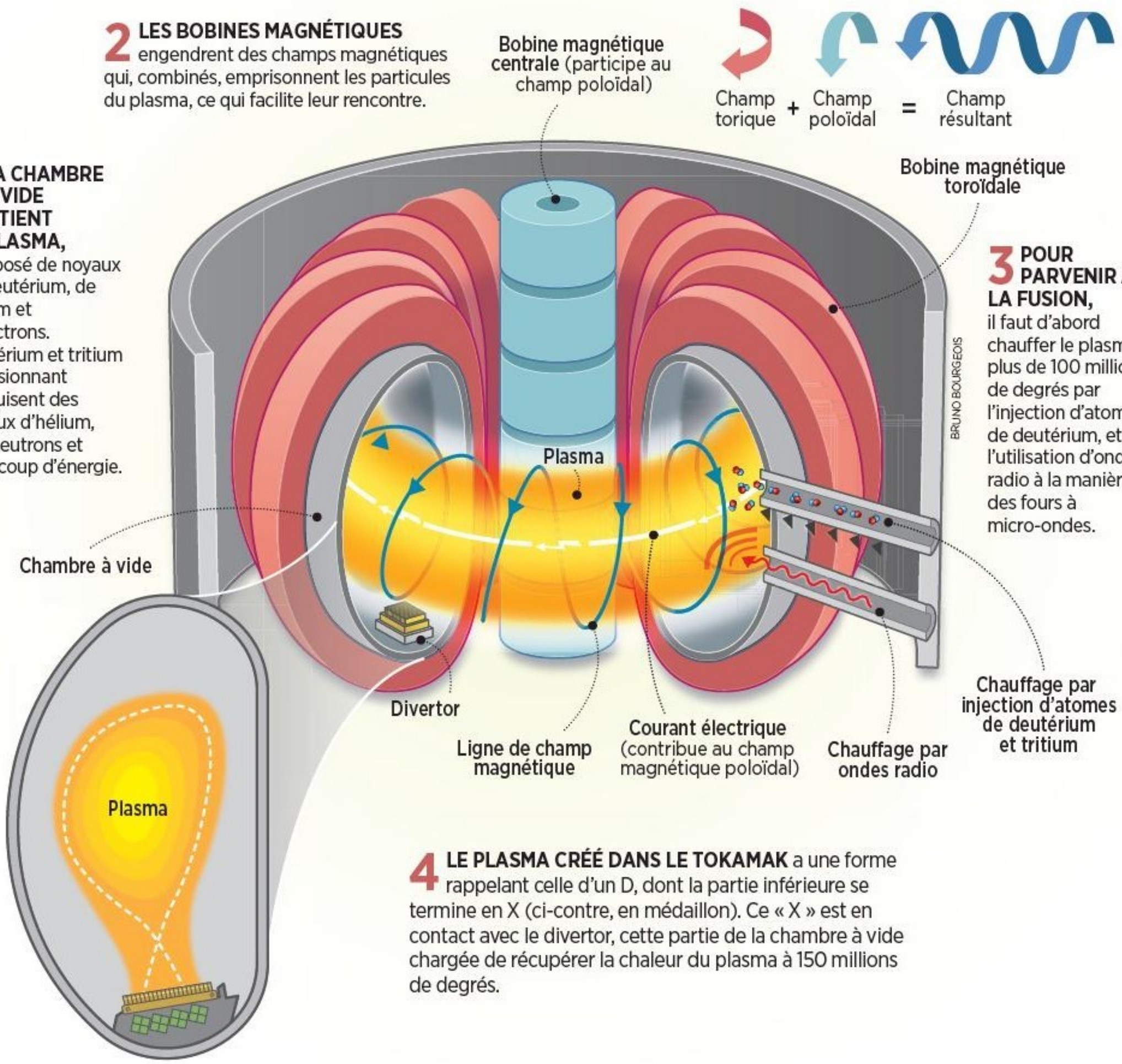
Pour trouver son « chemin », Iter se nourrit des résultats de la vingtaine d'autres tokamaks, de plus petite taille, que compte la collaboration regroupant 35 pays. Des records en tout genre ont d'ailleurs marqué l'année 2022, preuve de l'ébullition qui règne dans le secteur de la fusion. En février, le JET, un tokamak avec un plasma de 80 m³ au Royaume-Uni, a produit 59 mégajoules d'énergie en 5 secondes. East, en Chine, est parvenu à stabiliser un plasma durant 1056 secondes en avril. En Corée du Sud, KSTAR a annoncé un plasma à 100 millions de degrés durant 30 secondes en septembre… Ces résultats concernent différents aspects de la fusion, mais pour Alberto Loarte, leur

ITER ORGANIZATION

« Les caractéristiques d'Iter ne sont pas figées, contrairement à ce que l'on pourrait imaginer »

Alberto Loarte, chef de la division scientifique d'Iter

La fusion par confinement magnétique dans un tokamak



apport est fondamental. *« Les données issues de ces tokamaks nous permettent d'améliorer nos simulations sur le comportement du plasma dans Iter, de tester nos hypothèses de travail, de modifier nos protocoles. Avec une difficulté majeure : les équations décrivant le plasma et les champs magnétiques ne sont pas linéaires. Autrement dit, ce qui est vrai à une échelle ne l'est pas forcément à une autre… Mais, sur des aspects bien précis, des tokamaks peuvent fonctionner dans des conditions comparables à Iter.»* C'est notamment le cas d'une machine située à seulement un kilomètre du chantier. Il s'agit de West, le nouveau nom de Tore-Supra, produisant un plasma de 8 m³ (le centième d'Iter), mis en service par le CEA en 1988. En ce début 2023, il achève sa mue afin d'entamer une nouvelle série d'expériences pour Iter. Objectif : tester son « divertor ». Cette pièce constitue une partie du plancher du tokamak *(voir l'infographie ci-dessus)*. Son rôle est fondamental : il doit évacuer la chaleur produite par les particules issues des réactions de fusion, sans générer d'impuretés. Auparavant réalisé en carbone, le divertor sera cette fois en tungstène, un matériau choisi pour son point de fusion très élevé (plus de 3200 °C), et sa résistance à l'érosion. *« Notre objectif consiste à extraire l'énergie du plasma tout en le maintenant à une température élevée,* explique Jérôme Bucalossi,

DÉVELOPPEMENT

L'offensive des start-up

Selon le rapport 2022 de la Fusion Industry Association, il existe 33 start-up dans le monde se consacrant à la fusion, la plupart par confinement magnétique. Elles avaient collecté en tout 4,8 milliards de dollars (4,5 milliards d'euros) à la fin de l'année dernière. Et ce n'est pas fini. Renaissance Fusion, une start-up créée à Grenoble en 2020, a annoncé le 26 janvier avoir levé 15 millions d'euros lors d'un nouveau tour de table. Un chiffre à la hauteur de son ambition : fournir un réacteur de fusion capable de produire 1000 mégawatts entre 2032 et 2035… *« Mais à partir d'une technologie différente d'Iter,* précise Simon Belka, le chef de projet de Renaissance Fusion. *Nous utiliserons un stellarator pour confiner le plasma, plutôt qu'un tokamak. »*

Stellarator et tokamak se ressemblent un peu, en apparence. Mais les aimants du stellarator sont plus compliqués à fabriquer. En revanche, il produit un plasma plus stable. *« Notre objectif est de simplifier la conception des aimants, et nous pensons y parvenir en utilisant une nouvelle famille de matériaux supraconducteurs, les Rebco (Rare-earth barium copper oxide). Ils sont déposés directement sur les parois et sculptés au laser, ce qui permet de dessiner des formes d'aimants complexes. »*

La petite pousse envisage-t-elle de faire de l'ombre à Iter ? *« Il ne faut pas chercher à opposer les deux approches,* prévient Simon Belka. *S'il n'y a pas de collaboration formelle, nous sommes malgré tout en contact. Nous bénéficierons de leur expertise, par exemple pour tout ce qui concerne la sûreté. Ils mettent au point une réglementation dont nous allons nous inspirer. Par ailleurs, le but d'Iter n'est pas de commercialiser la fusion, mais de faire progresser la recherche. Il faudra bien que derrière, il y ait des start-up pour prendre la relève. »*

Le stellerator, un procédé différent du tokamak pour confiner le plasma, choisi par la start-up française Renaissance Fusion.

MAX PLANCK INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

directeur de l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique du CEA, qui a dirigé la mue de Tore-Supra en West. *Cela veut dire absorber une puissance de l'ordre de 10 MW par m². C'est dix fois plus que ce qu'encaissaient les tuiles du bouclier de la navette spatiale américaine lorsqu'elle rentrait dans l'atmosphère. Iter sera soumis au même flux de chaleur. Par ailleurs, West est prévu pour fonctionner durant cinq ans, cela nous donnera donc des indications sur la façon dont les pièces vont vieillir. »*

Plus généralement, West étudiera le plasma de « bord », à proximité des parois donc. *« Il faut parfaitement maîtriser cet aspect, car de tels flux de chaleur peuvent facilement faire fondre les parois. Elles sont aussi des sources d'impuretés. Il faut donc s'assurer que le plasma proche du bord ne les draine pas vers le centre, mais au contraire les maintienne sur des lignes de champs proches du bord. »*

Pour Iter, les ingénieurs vont donc devoir « sculpter » finement le champ magnétique confinant le plasma, qui prendra une forme de D allongé se terminant en X, au niveau du divertor. Trois types de champ magnétique se combineront pour cela : celui généré par les monstrueuses bobines toroïdales, un autre issu du courant électrique circulant dans le plasma, et enfin celui des bobines poloïdales. On devine sans peine la difficulté… *« La physique des plasmas est complexe,* acquiesce Jérôme Bucalossi. *Les champs magnétiques extérieurs se combinent aux champs générés par les particules en mouvement. Les équations deviennent rapidement très compliquées*

à résoudre. C'est pourquoi nous avons besoin de mesures in situ *pour observer le comportement du plasma, déterminer les phénomènes que nous pouvons négliger en fonction de nos objectifs, et ceux qui, au contraire, prennent plus d'importance que prévu, comme des turbulences.* »

Construction retardée et facture alourdie alimentent les critiques

Même si à Cadarache leur écho semble amoindri, l'annonce d'un nouveau report dans la construction du tokamak d'Iter, et d'une augmentation de la facture, alimente les critiques, nombreuses, dont Iter est l'objet depuis ses débuts. « *Gabegie financière* », « *pas pertinent pour lutter contre le réchauffement climatique* [car trop tardif]… » Les associations écologistes ne portent pas le projet dans leur cœur. Côté scientifique, on observe aussi une certaine réserve que Yves Bréchet, membre de l'Académie des sciences et ancien haut-commissaire à l'Énergie atomique, résume ainsi : « *Il y a un grand intérêt scientifique que personne ne conteste à comprendre comment stabiliser un plasma, ou à faire en sorte qu'une réaction de fusion s'auto-entretienne. Mais de là à dire que l'on sera capable de passer ensuite au stade industriel, il y a un monde. Réussir le prototype n'est pas garanti, et ne garantit pas le passage à l'échelle supérieure. C'est beaucoup d'argent mobilisé sur un seul projet, qui m'apparaît comme un pari risqué.* » Un exemple de ce pari : Iter devra démontrer qu'il peut produire une partie de son combustible. Car si l'on peut extraire le deutérium de l'eau de mer, le tritium n'existe

PHILIPPE PSAILA/SPL/SUCRÉSALÉ

Inspection d'une cryopompe destinée à refroidir à -269°C les bobines d'Iter.

qu'à l'état de traces sur Terre. Il est produit par l'action du rayonnement cosmique sur les molécules de l'atmosphère (environ 200 grammes par an). Et il est radioactif à courte période : un stock de tritium est divisé par deux tous les 12,3 ans. Il est possible de le fabriquer en bombardant du lithium avec des neutrons issus de la fusion, et Iter devra démontrer que l'on peut le faire dans les conditions de la fusion. Une étape indispensable avant de passer à l'industrialisation, sachant que les réserves mondiales de tritium sont estimées… à 25 kg, produit par certains types de réacteurs nucléaires à fission.

Mais rêvons un peu… En théorie, la fusion par confinement magnétique promet à l'humanité une source d'énergie abondante, sûre (il n'y a pas de risque d'emballement comme pour la fission), et produisant très peu de déchets radioactifs (aucun à vie longue). Une telle perspective ne justifie-t-elle pas le pari d'Iter ? « *J'ai coutume de dire, sous la forme d'une boutade, que la fusion résoudra nos problèmes d'énergie, lorsque les voyages interplanétaires résoudront nos problèmes de surpopulation* », dit en riant Yves Bréchet.

En revanche, la Société française d'énergie nucléaire (Sfen), qui regroupe des experts autour de l'avenir du nucléaire, y croit, selon son porte-parole Ludovic Dupin : « *Un verrou important vient de sauter avec le résultat du laboratoire national Lawrence-Livermore* [lire p. 28] *: il est possible de produire plus d'énergie qu'on en apporte au système. L'autre indicateur favorable est l'apparition de nombreuses start-up consacrées à la fusion et qui attirent les capitaux* [lire l'encadré p. 40]. *C'est la preuve que des gens y croient.* » De quoi dessiner un nouveau mix énergétique pour la France à l'orée du prochain siècle, selon la Sfen. « *Dans une première étape, des réacteurs à fusion cohabiteront avec les réacteurs à fission de troisième et quatrième générations. Ils seront complémentaires car la fission développe désormais des petits réacteurs, pour alimenter une usine ou un quartier par exemple, alors que la fusion sera plutôt réservée aux grosses productions, de 1 000 MW.* »

L'avènement de cette énergie abondante et décarbonée sera par ailleurs une bonne nouvelle pour la lutte contre le dérèglement climatique. « *Selon un rapport de RTE* [chargé du transport de l'électricité], *la France devra passer de 2600 térawattheures d'énergie consommée par an à 930 TWh en 2050, si elle veut tenir ses engagements sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre,* souligne Ludovic Dupin. *Pour cela, il faudra augmenter de 35 % la consommation d'électricité décarbonée. C'est ainsi : pour consommer moins d'énergie fossile, il faut plus d'électricité.* » Fusion ou pas fusion, l'avenir sera de toute façon électrique. ■ **Fabrice Nicot** @fnicot07

SFEN

« Dans un premier temps, des réacteurs à fusion cohabiteront avec des réacteurs à fission. Ils seront complémentaires »

Ludovic Dupin, porte-parole de la Société française d'énergie nucléaire

SCIENCES FONDAMENTALES

Le programme américain Artemis projette d'exploiter les ressources minières de la Lune en vue notamment de les transformer en carburant pour de futures missions martiennes. (vue d'artiste).

Lune

La reconquête est lancée

Le programme Artemis, piloté par la Nasa, prévoit d'utiliser une station spatiale habitée comme base relais entre la Terre et la surface lunaire dans les années 2030. Les premiers modules de la Lunar Gateway sont en cours d'assemblage en Italie. Reportage sur un chantier pharaonique.

Par Sylvie Rouat @srouat1

Turin, la capitale du Piémont en Italie, est généralement associée à la production des voitures Fiat. Ce que l'on sait moins, c'est qu'elle joue aussi un rôle essentiel dans le vol spatial habité européen et américain, après avoir notamment construit la moitié du volume pressurisé de la Station spatiale internationale (ISS). C'est ici, sous les verrières des gigantesques halls industriels de Thales Alenia Space (TAS), qu'est aujourd'hui assemblé le premier des quatre modules de la future station spatiale Lunar Gateway. Des pièces cylindriques de 3 mètres de diamètre préfigurent ce que sera bientôt le module d'habitation et de logistique Halo de la Nasa, l'un des deux premiers composants de Gateway qui seront lancés en 2025. Les panneaux en alliage d'aluminium sont conçus pour protéger l'équipage des impacts de micrométéorites et des radiations cosmiques. Le module américain servira également de centre de commande, de communication et de gestion de l'énergie. Doté de trois ports où pourront s'amarrer les vaisseaux spatiaux, il a une capacité d'accueil de quatre astronautes pendant 30 à 40 jours. Dans un bâtiment industriel voisin a été assemblé une sorte de pavillon témoin, qui permet de s'imaginer le quotidien des futurs locataires du module européano-japonais I-HAB, qui viendra ensuite agrandir l'espace habitable de la station. L'espace dans lequel les astronautes pourront partager leurs repas est équipé de cabines souples permettant de s'isoler pour dormir et d'un lieu d'expérimenta-

NASA

Dix ans d'un calendrier ambitieux

2022 ARTEMIS 1
Cette mission inaugurale de 25 jours sans équipage a testé les systèmes du vaisseau Orion lors d'un survol de la Lune.

2024 ARTEMIS 2 Quatre astronautes devraient à nouveau survoler la Lune à bord d'Orion. SpaceX exécutera à cette occasion un vol de démonstration de son atterrisseur lunaire.

2025 ARTEMIS 3
Premier atterrissage d'un équipage sur la Lune depuis 1972 par un vaisseau Starship. Début d'assemblage de la station Gateway.

2027 ARTEMIS 4
Deuxième mission d'atterrissage avec équipage du programme grâce au vaisseau Starship.

2028 ARTEMIS 5
Livraison du module technique européen Esprit à Gateway. Premiers essais de véhicules lunaires.

2031 Quatre équipages devraient séjourner 30 jours dans Gateway et sur la surface lunaire.

tion scientifique, consacré notamment à la culture de plantes comestibles. Ce lieu de vie de 5,9 mètres de long pour 3,4 mètres de diamètre compose, avec le module américain Halo, un volume habitable total de 125 m³ (contre 388 m³ pour l'ISS). *« Cette maquette présente tous les développements technologiques réalisés pour les modules de Gateway,* détaille Franco Fenoglio, responsable des programmes d'exploration planétaire humaine chez TAS. *La protection thermique est faite de plusieurs couches de tissus aluminisés et d'une strate d'air isolante. Pour le hublot, on utilise quatre couches en acrylique, moins cher et plus léger que le verre. Mais exposé à l'environnement spatial, il pourrait jaunir. La construction d'un module avec hublot intégré est une première. Aujourd'hui, les astronautes réclament toujours une fenêtre, même si dans l'espace profond tout est noir. L'astronaute italien Luca Parmitano explique que la possibilité de regarder à l'extérieur délivre de la sensation de confinement, de la claustrophobie. »*

Des interfaces robotisées fonctionnant en autonomie

La station Gateway a été proposée par la Nasa dès 2017, initialement comme base d'entraînement pour de futures missions vers Mars et les astéroïdes, objectifs qui lui avaient été assignés sous la présidence de Barack Obama. À cette époque, l'agence spatiale américaine avait déjà en chantier le vaisseau spatial Orion et le lanceur lourd SLS (Space Launch System), plus puissant que la fusée Saturn V de la mission Apollo. Leur construction avait été décidée dans les années 2000 après l'abandon de la navette spatiale. Mais voilà qu'en 2019, le président Donald Trump redonne finalement la Lune pour cap à la Nasa. Ainsi naît le programme Artemis, qui prévoit d'utiliser la station cis-lunaire comme base relais entre la Terre et la surface lunaire. Cette reconquête de la Lune se fera à l'aide des partenaires historiques de l'ISS (Europe, Japon, Canada), à l'exception des Russes, ainsi qu'avec de nouveaux acteurs privés. SpaceX, l'entreprise du milliardaire Elon Musk, va par exemple contribuer, avec ses lanceurs lourds Falcon Heavy et Starship, au transport d'éléments de Gateway et pour des vols habités. L'as-

DROIT INTERNATIONAL

L'enjeu des ressources lunaires

Rédigés par les États-Unis et signés par 23 États depuis 2020, les accords Artemis établissent un ensemble de principes destinés à organiser l'occupation et l'exploitation future de la Lune. Celle-ci est aujourd'hui régie par le traité de 1967, qui considère tous les corps célestes comme *« l'apanage de l'humanité »*, que personne ne peut s'approprier. Mais l'actuel appétit pour la Lune des gouvernements et des acteurs privés nécessite de nouvelles règles, notamment pour établir des zones sécurisées *« au sein desquelles un État peut mener des activités sans être perturbé par d'autres entités,* explique Alexandre Chazelle, doctorant en droit des activités spatiales au Cnes, l'agence spatiale française. *Mais les opposants à ces accords craignent qu'un soi-disant champ de recherche devienne à terme une mine lunaire. »* Soit une appropriation d'un espace commun. Et si cela touche aux rares réservoirs d'eau glacée, actuellement interdits de fonte par les règlements, l'enjeu serait alors stratégique. Cela explique pourquoi les Chinois s'inquiètent du programme spatial américain, qui pourrait empiéter sur leurs ambitions spatiales en préemptant le pôle sud lunaire, où sont concentrés ces fameux stocks d'eau gelée. La France a signé en juin 2022 ces accords. La Chine, la Russie et l'Allemagne y sont opposés.

THALES ALENIA SPACE

La future station spatiale Lunar Gateway (vue d'artiste). Le premier de ses composants, le module d'habitation et de logistique Halo de la Nasa, est en cours d'assemblage à Turin (Italie), dans l'usine de Thales Alenia Space (en médaillon).

semblage de la Lunar Gateway devrait commencer en 2027 sur une orbite elliptique passant au-dessus du pôle sud de la Lune. Cette orbite, qui s'étend de 3000 à 70 000 km de notre satellite, est favorable aux communications avec la Terre. Un embryon de station sera d'abord composé des modules PPE (Power and Propulsion Element) et Halo (Habitation and Logistics Outpost). Le premier fournira énergie électrique et propulsion à l'aide de ses panneaux solaires : il pourra ainsi maintenir la station sur son orbite ou la déplacer vers différentes orbites lunaires. Le quartier d'habitation Halo, qui assurera également le commandement de Gateway, composera une sorte de zone de transit. Ses ports d'amarrage lui permettront à la fois d'accueillir les vaisseaux en provenance de la Terre et d'organiser les expéditions à la surface de la Lune grâce à un système d'atterrissage et de remontée vers la station — le Human Landing System (HLS). La Nasa prévoit de privilégier dans un premier temps les sites d'atterrissage autour du pôle sud et, dans les années 2030, d'augmenter progressivement les durées d'expédition en surface. L'objectif des astronautes sera d'explorer l'environnement lunaire, en vue *« d'y séjourner durablement, pour y travailler selon des objectifs gouvernementaux et commerciaux »*, explique Bill Nelson, administrateur de la Nasa.

Les modules européens d'habitation I-Hab et de ravitaillement Esprit — destiné notamment à approvisionner les vaisseaux spatiaux — viendront à terme compléter la station qui, au final, ne dépassera pas 40 tonnes, soit dix fois moins que l'ISS. Parce qu'ils seront souvent inhabités, les modules devront pouvoir fonctionner de manière autonome. Ils seront donc équipés d'interfaces robotiques permettant de réaliser la maintenance et des opérations à distance. Notamment des bras articulés qui serviront aussi aux équipages pour contrôler les expériences en milieu spatial. Trois premiers instruments scientifiques ont déjà été sélectionnés. Deux d'entre eux seront installés à l'extérieur de la station afin de surveiller les vents solaires et les rayonnements à haute énergie, en vue d'établir une météo spatiale à destination des astronautes. Un réseau de dosimètres placé à l'intérieur de Halo permettra quant à lui de mesurer l'efficacité du blindage contre ces rayonnements cancérogènes, qui peuvent aussi avoir des effets délétères

FRANCO FENOGLIO

« La construction d'un module avec hublot intégré est une première. Aujourd'hui les astronautes réclament une fenêtre »

Franco Fenoglio, responsable des programmes d'exploration planétaire humaine chez Thales Alenia Space

BRUNOLEVY

ENTRETIEN

XAVIER PASCO

DIRECTEUR DE LA FONDATION POUR LA RECHERCHE STRATÉGIQUE

« Ce programme répond à une urgence économique »

Pourquoi ce retour sur la Lune ?
Le vol habité américain a connu des difficultés après le retrait de la navette et se cherchait un avenir au-delà de l'ISS. En lui donnant Mars comme unique objectif, Barack Obama a déstabilisé la Nasa au moment même où Elon Musk démontrait ses ambitions spatiales. La décision de Donald Trump de retourner sur la Lune a remis l'agence en haut de la pyramide industrielle, avec la possibilité de déléguer aux acteurs privés les services logistiques. Cela s'est passé pour la station spatiale, cela se passera pour la Lune. Car à la différence d'Apollo, il s'agit cette fois d'occuper l'espace entre la Terre et la Lune d'une manière plus permanente et plus industrielle.

C'est donc un programme avant tout économique ?
Il est essentiel pour les industriels américains de maintenir leur niveau d'activité. Le programme Artemis enveloppe cette urgence économique d'un discours narratif sur l'importance de s'établir sur la Lune et d'exploiter ses ressources. Les grands programmes spatiaux naissent d'une conjonction d'intérêts. Politique d'abord, car il était devenu nécessaire de reconstruire un discours sur l'importance du vol habité, en perte de crédibilité. Économique ensuite, car cette manne financière alimente d'autres projets des industriels. Et institutionnel enfin, avec la Nasa qui retrouve sa place au centre du jeu.

Y a-t-il une course avec la Chine, qui prévoit aussi une base lunaire?
La Chine est dans sa logique de rattrapage des attributs d'une puissance internationale accomplie. Les grandes ambitions spatiales sont représentées aujourd'hui par les États-Unis, avec dans leur sillage l'Europe et d'autres nations partenaires, et la Chine qui fait de même avec la Russie. Mais les États-Unis déterminent encore le devenir du secteur. Et le vol habité est un constituant de leur identité. ■

Propos recueillis par S. R.

sur le système cardio-vasculaire et nerveux des astronautes.
Les étapes de la nouvelle conquête lunaire demeurent incertaines au-delà de 2027, les Américains progressant pas à pas. Le programme Artemis est néanmoins sur les rails. Le lancement inaugural de la capsule Orion par SLS le 16 novembre 2022 a permis à ce vaisseau sans équipage de faire le tour de la Lune en 25 jours, avant d'amerrir dans le Pacifique. Les données enregistrées à cette occasion vont sécuriser le prochain vol d'Orion qui emportera quatre astronautes pour un nouveau tour de la Lune, en 2024. C'est surtout l'atterrissage d'Artemis 3, en 2025, qui consacrera réellement le retour des Américains sur la Lune, désertée depuis la mission Apollo 17 en 1972. La mission suivante sera consacrée à l'assemblage des premiers modules de Gateway, avec également un alunissage. Il est intéressant de noter que la Nasa a fait appel au vaisseau privé Starship de SpaceX pour assurer ces descentes finales sur la Lune. Ce qui implique une délicate opération de rendez-vous en orbite lunaire entre les vaisseaux Orion et Starship… Or ce dernier, d'une conception inédite, n'a encore jamais volé !

Un terrain d'expériences utiles pour les missions martiennes

À plus long terme, la Nasa envisage une installation pérenne sur la Lune en y construisant une base lunaire. Cela pourrait se faire grâce à l'impression 3D, en utilisant le régolithe, ou en investissant les vastes tunnels de lave encore inexplorés qui semblent s'étendre sous plusieurs dizaines de mètres de basalte. Ils pourraient offrir une isolation naturelle contre les rayonnements cosmiques et les très grands écarts de températures diurne et nocturne à la surface. L'eau extraite des glaces préservées dans des cratères perpétuellement plongés dans l'ombre alimenterait cette base. De nombreuses entreprises privées travaillent déjà au développement de solutions pour vivre et travailler dans cet environnement. *« Il y a maintenant une nouvelle compétition pour la production de solutions d'atterrissage, de protection des radiations, d'impression 3D pour fabriquer les pièces de rechange ou encore de systèmes de production de nourriture,* décrit Franco Fenoglio. *La Lune est un terrain d'expérience sur lequel on va pouvoir développer et tester différents systèmes qui permettront ensuite de survivre sur Mars. C'est aussi une opportunité de savoir comment exploiter les ressources du sol lunaire. »* Il est en effet envisagé d'extraire l'hydrogène prisonnier du régolithe pour en faire du carburant. Du fait de sa moindre gravité, qui nécessite une plus faible énergie pour s'en extraire que sur Terre, la Lune pourrait ainsi servir de station-service pour les vaisseaux à destination de Mars et au-delà. Pour l'heure, les ingénieurs s'affairent sans relâche sous les verrières à Turin. Le temps leur est compté, car le module Halo doit être livré en fin d'année à l'industriel américain Northrop Grumman. ■

DU 22 AU 30 NOV. 2023

CROISIÈRE SUR le Nil

A bord du MS KAHILA *****

Louxor - Esna - Kôm Ombo - Assouan

Le Caire et son nouveau Musée

9 JOURS / 8 NUITS

A PARTIR DE **2 790 €/PERS. EN TOUT INCLUS** [1]

AVEC LA PARTICIPATION DE [2]

VERNUS PASCAL, Egyptologue

CHRISTIAN GRATALOUP, Géohistorien

YASMINE FOUAD, Ministre de l'environnement

DOMINIQUE LEGLU, Directrice éditoriale de SCIENCES et AVENIR

UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur www.sa-egypte.fr

Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

[1] Voir détails sur la brochure [2] Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Le rêve d'un Internet sans mot de passe

Le système Passkey proposé par Apple ou Google permet de s'authentifier en ligne de façon simple et sécurisée. Mais d'autres travaux de spécialistes de sécurité informatique cherchent moins à supprimer le mot de passe qu'à le renforcer par des techniques complémentaires.

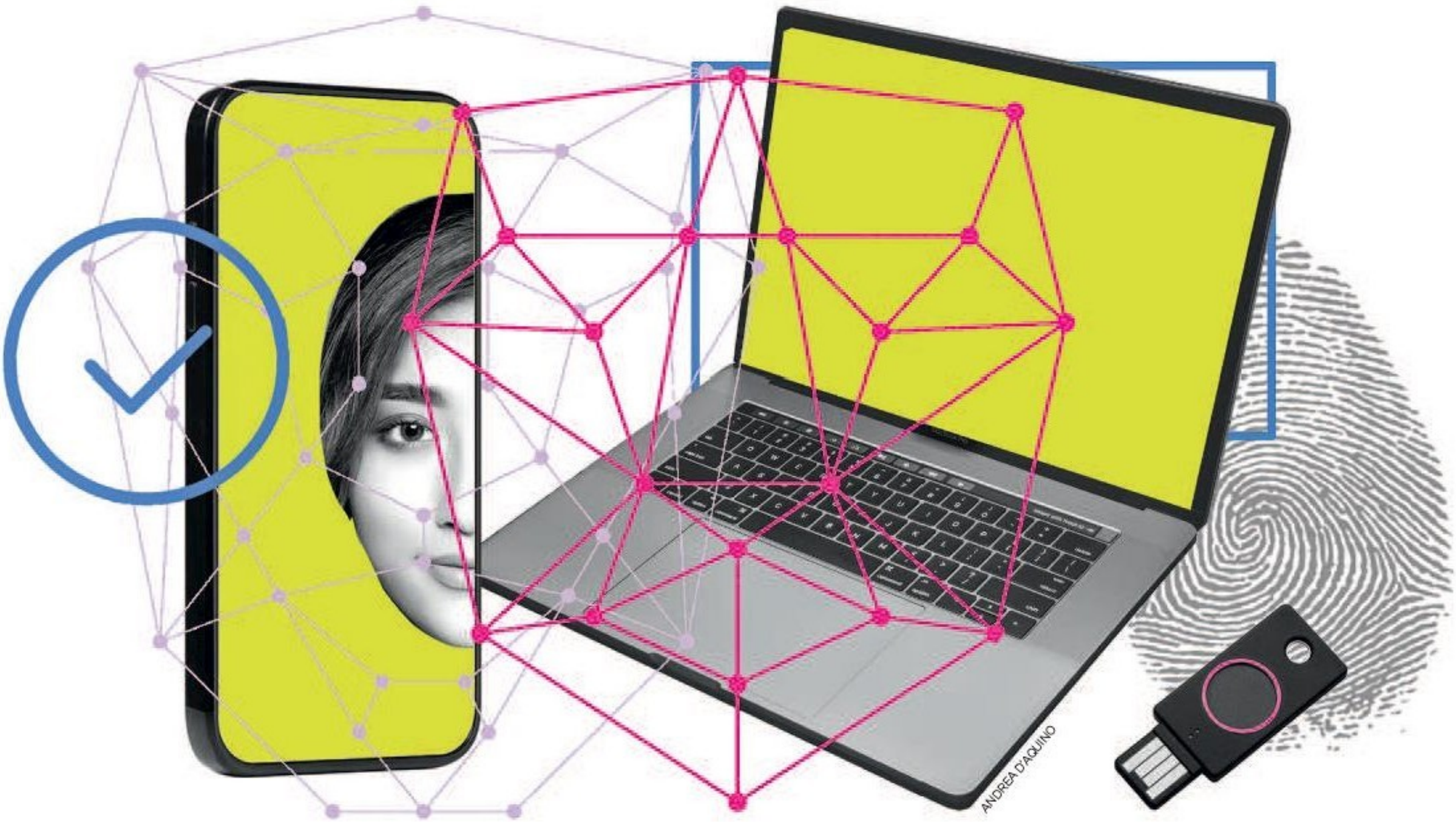
La vie sans mot de passe… C'est le rêve de tout internaute : ne plus avoir à créer et à saisir ces sempiternelles combinaisons de lettres, de chiffres et de caractères spéciaux, selon les recommandations des spécialistes de sécurité informatique. Or, entre le commerce électronique, les réseaux sociaux, l'administration, les banques ou les assurances en ligne, l'utilisateur actuel d'Internet doit faire avec des dizaines de comptes personnels. Impossible de mémoriser tous les mots de passe correspondants, à moins de se servir plusieurs fois du même, ce qui est la dernière chose à faire pour éviter de se faire pirater trop facilement. C'est dans ce contexte qu'Apple a lancé Passkey, à l'occasion du déploiement, en septembre 2022, d'iOS 16, dernière version de son système d'exploitation mobile. La promesse ? Fini le mot de passe ! Ce système d'authentification était en fait en préparation depuis des années au sein de l'alliance Fido, regroupant des industriels des technologies (Meta, Amazon, Intel, Microsoft, Paypal, Google…) autour de la définition de standards d'authentification. Il a aussi été adopté par Google pour les mobiles Android et les navigateurs Chrome, par Microsoft ou encore Paypal.

Lorsque l'utilisateur s'inscrit sur un service en ligne ou une application mobile ayant adopté Passkey, deux clefs cryptographiques spécifiques au service en question sont générées. L'une, la clef privée, reste dans un espace verrouillé et chiffré de l'appareil de l'utilisateur. L'autre, la clef publique, est stockée sur un serveur du service, mais n'est ni secrète ni cachée. Chaque demande d'accès prend la forme d'un défi cryptographique. C'est-à-dire que la clef publique du service en ligne crée un problème mathématique qui ne peut être résolu qu'avec la clef privée. Pour appeler cette dernière, l'utilisateur déverrouille d'abord son appareil selon sa méthode habituelle (code PIN, empreinte digitale, reconnaissance faciale…). Puis il saisit son identifiant et, au lieu d'ajouter son

G. SCAGNELLI /INRIA

« Passkey renforce la puissance des géants du Web qui se positionnent en fournisseurs d'authentification numérique »

Mathieu Cunche, enseignant chercheur à l'Insa de Lyon et membre de l'équipe Privatics d'Inria



mot de passe, clique sur une icône « Passkey ». *« L'internaute fait ainsi la preuve qu'il détient la bonne clef privée mais sans dévoiler cette clef »*, résume Mathieu Cunche, enseignant chercheur à l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Lyon et membre de l'équipe Privatics d'Inria (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique). L'usage de clefs cryptographiques n'a rien de nouveau. En revanche, que des géants du numérique le déploient à grande échelle pour en faire un standard est une première.

Des contraintes pour passer à un autre univers technologique

On le voit, une clef privée est liée à un utilisateur, mais aussi à son appareil, ou à plusieurs appareils synchronisés d'un même environnement technologique (Apple, Google). Ce qui fait toute la robustesse du dispositif quand, jusque-là, les alternatives aux mots de passe comme la biométrie *(lire l'encadré p. 50)* ou les gestionnaires de mots de passe n'avaient jamais vraiment convaincu. Passkey n'est toutefois pas sans contraintes. Si l'internaute a généré ses clefs au départ avec Android, celles-ci restent valides s'il adopte un appareil Apple, mais il faut les transférer à la main et une par une vers le nouvel espace sécurisé. Et, par définition, il est impossible de faire fonctionner Passkey sur un autre ordinateur que le sien. Dans ce cas de figure, le service en ligne auquel on veut accéder envoie un QR code qu'il faut scanner avec son smartphone stockant la clef privée associée.

En parallèle, la connexion Bluetooth doit être activée, pour prouver au système que smartphone et ordinateur sont à proximité et qu'il ne s'agit pas d'une tentative d'accès pirate à distance. *« Mais surtout,* pointe Mathieu Cunche, *ce dispositif renforce la puissance des Gafam* [les géants du Web] *qui se positionnent en fournisseurs d'authentification numérique. Une fois de plus, ils se rendent incontournables. »*

Reste à savoir si assez de services en ligne proposeront ce système pour en faire une solution pérenne. Car, paradoxalement, si les limites du mot de passe sont reconnues de tous les spécialistes, les recherches en matière d'authentification visent moins à le supprimer qu'à le renforcer par d'autres techniques. En 2015, une doctorante du Laboratoire d'informatique en image et système d'information (Liris), près de Lyon, proposait d'authentifier les participants à des plateformes de formation en ligne certifiante par leurs « traces d'interaction ». Le classique couple *login*-mot de passe reste de vigueur pour entrer sur la plateforme ; mais ensuite, des éléments comme la durée des sessions, les résultats aux QCM, les contenus consultés, le temps de réaction sont captés tout au long de la formation pour constituer une ▶

signature du comportement en ligne de l'apprenant. « *À chaque nouvelle action, on calcule la signature, qui reçoit un score permettant de dire si la personne qui suit la formation a changé* », explique Fatma Derbel, l'auteure du projet. L'idée est en effet de détecter la triche, si des apprenants se font remplacer par d'autres aux examens. Une expérimentation de cette technique est en préparation.

L'empreinte numérique liée aux données de l'appareil

Une autre piste explorée est celle du *browser fingerprinting*, à savoir l'empreinte numérique d'un appareil constituée d'éléments techniques : version de système d'exploitation, extensions de navigateur, langue, fuseau horaire, taille de police de caractères, paramètres audio, etc. Il a déjà été prouvé qu'un tel ensemble de données permet de distinguer un utilisateur d'un autre. Or, si le traçage publicitaire y a recours, ce n'est pas le cas de la vérification d'identité en ligne. Pas même pour payer, comme l'a constaté Antonin Durey, auteur en 2022 d'une thèse sur le *browser fingerprinting* dans l'équipe Spirals du laboratoire Cristal et au centre Inria de l'université de Lille.

La solution développée pour cette thèse collecte non seulement 50 attributs d'empreinte, mais détermine aussi leur interdépendance, pour établir plus facilement des différences entre appareils. Un algorithme pondère chaque élément dans l'unicité de l'empreinte, ceux qui changent le plus souvent ayant moins de poids. L'enjeu est de garantir l'authentification (ou bloquer une tentative d'accès illégitime) alors même que, par définition, une empreinte numérique est instable (mises à jour, réglages modifiés…). « *Le système d'authentification dispose d'un stock de plusieurs empreintes pour un même ordinateur et à chaque connexion, l'algorithme évalue si les éventuels changements relèvent d'une simple évolution de l'empreinte ou s'il y a trop de différences pour qu'il puisse s'agir du même ordinateur.* »

GETTY ILMAGES

TECHNOLOGIE

Les espoirs déçus de la biométrie

Empreinte digitale, réseau veineux de la main, iris, visage… Intrinsèquement liées à leur titulaire, les données biométriques ont un temps fait figure d'idéal d'authentification. Or, elles souffrent de deux problèmes majeurs. La plupart sont dites à trace, à savoir qu'elles peuvent être récupérées par un tiers, et pas seulement les empreintes digitales. En France, la Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil) considère qu'en l'état actuel des technologies, c'est le cas de toute donnée biométrique. L'autre problème tient à leur nature permanente. En cas de vol de mot de passe, un utilisateur peut en paramétrer un nouveau et rendre obsolète celui qui a été piraté. Avec la biométrie, c'est impossible. C'est pourquoi celle-ci est recommandée pour des accès précis, dans des contextes déjà très sécurisés et sensibles, et en renfort d'autres moyens d'authentification.

L'institut de recherche technologique (IRT) B-Com a conçu un dispositif du même genre, appelé Serenity.

L'intérêt du *browser fingerprinting* ? Rendre inutilisable un mot de passe volé, notamment par *phishing*, quand les internautes sont leurrés par des liens vers des pages Web imitant celles de sites légitimes (impôts, La Poste, banques…). « *Quand les voleurs iront ensuite sur le véritable site, ils auront beau avoir le mot de passe, ils seront bloqués car ils n'utiliseront pas le bon ordinateur* », résume Gaëtan Le Guelvouit, à l'IRT B-Com. Pour gérer l'évolutivité de l'empreinte, l'équipe a entraîné son algorithme sur une base de millions d'empreintes numériques et leurs évolutions dans le temps, afin qu'il sache identifier si deux empreintes appartiennent à deux ordinateurs ou au même. Le mot de passe n'est donc pas supplanté par l'empreinte numérique ; au contraire, les deux sont liés, la seconde étant calculée et vérifiée au moment où l'internaute soumet le premier. « *L'empreinte numérique n'est pas infalsifiable,* prévient Antonin Durey, *un cyberattaquant peut la collecter, la recopier. Son rôle est de renforcer l'authentification en établissant un niveau de risque de la tentative de connexion.* »

Reste une question non négligeable : à quel moment traces d'interaction ou empreinte numérique deviennent-elles des données personnelles, dont il faudra encadrer l'usage ? Derrière la technologie, la réflexion réglementaire n'est jamais loin. ■

Arnaud Devillard
@A_Devila

L'accès aux soins pour tous : un défi à relever ensemble.

Catherine Bechereau est chargée des relations avec les personnes qui souhaitent transmettre leurs biens à Médecins Sans Frontières. Pour elle, chacun peut jouer un rôle décisif dans la mission de l'association et relever ce formidable défi : être toujours là, pour soigner ceux qui en ont besoin.

© Vincenzo Livieri

■ Quelle est la mission de Médecins Sans Frontières ?

Médecins Sans Frontières fournit un accès aux soins aux personnes victimes de catastrophes naturelles, de conflits armés ou d'épidémies, pour défendre ce qui devrait être un droit universel : l'accès aux soins pour tous. Pour nous, il est intolérable qu'une mère perde son bébé faute d'un suivi médical adapté ou qu'un malade ne prenne plus ses médicaments parce que les stocks manquent. Même si les Conventions de Genève qui dictent les règles en matière de protection des civils et des personnels humanitaires lors de conflits ne sont pas respectées, nous continuerons d'être là, d'alimenter en médicaments des structures de santé et de soigner.

■ D'où proviennent les ressources de Médecins Sans Frontières ?

99 % des ressources de Médecins Sans Frontières proviennent de donateurs individuels et de testateurs, c'est à dire des personnes qui nous transmettent leurs biens après leur décès. Cela nous permet d'agir en toute indépendance.

■ Quelle est la différence entre léguer et donner ?

Le legs est un don fait par testament qui prend effet au décès du testateur, contrairement à la donation qui permet de donner de son vivant. Une assurance-vie peut également être transmise par un legs ou être donnée au cours de sa vie.

■ Qui sont les personnes qui choisissent de transmettre leurs biens à Médecins Sans Frontières ?

Les personnes qui nous contactent pour évoquer avec nous un projet de transmission ont des parcours de vie très différents. Certaines d'entre elles ont découvert Médecins Sans Frontières sur le terrain, au cours d'un de leurs voyages, d'autres ont fait carrière dans le domaine médical, d'autres encore soutiennent Médecins Sans Frontières de génération en génération... Il n'y a pas deux histoires qui se ressemblent et pas de profil type de testateurs. Le fait de transmettre ses biens est un acte personnel, propre aux envies, aux convictions et à l'histoire de chacun.

■ Comment accompagnez-vous les testateurs dans leur projet de transmission ?

Les personnes que je rencontre me confient parfois leur parcours de vie et leurs motivations. Mon rôle est de les écouter avec attention et bienveillance et de m'adapter à chaque situation pour leur proposer un accompagnement sur mesure. Je réponds à leurs interrogations, leur transmets des documents d'information et, si nécessaire les mets en relation avec nos experts du pôle juridique, legs et donation pour les questions plus spécifiques. Je suis disponible par e-mail, par téléphone, à domicile ou dans nos locaux pour rencontrer ceux qui le veulent et qui souhaitent savoir comment soutenir durablement une mission qui leur tient à cœur. Mon travail est d'autant plus passionnant que chaque projet de transmission est différent et intimement lié à des histoires personnelles.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE / Demande de documentation gratuite et confidentielle

À renvoyer, sans affranchir votre enveloppe, à Médecins Sans Frontières Libre réponse - Autorisation 10617 75884 Paris Cedex 18

☐ Oui, je souhaite recevoir sans engagement de ma part, votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie.

MES COORDONNÉES ☐ M ☐ Mme

Prénom : ..... Nom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

E-mail ..... @

Téléphone : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

© MSF

Catherine Bechereau, chargée des relations testateurs, répond à vos questions en toute discrétion.

TÉL : 01 40 21 29 09

E-MAIL : relations.testateurs@paris.msf.org

Les informations recueillies dans ce formulaire sont destinées au département de la collecte de dons et aux tiers mandatés par MSF à des fins de gestion interne et pour faire appel à votre générosité. Elles ne sont conservées que pendant la durée strictement nécessaire à la réalisation de ces finalités.
Ces données peuvent faire l'objet d'un transfert, notamment vers un pays en dehors de l'Union Européenne, qui sera encadré par les garanties appropriées requises par la réglementation sur la protection des données. Conformément au RGPD et à la Loi Informatique et Libertés, vous disposez de droits sur vos données (accès, rectification, suppression, limitation, portabilité, opposition) quant à leur traitement et à leur utilisation à des fins de prospection, que vous pouvez exercer en nous écrivant par e-mail à donateurs@paris.msf.org ou par courrier à 14-34 avenue Jean Jaurès - 75019 PARIS. Pour plus d'information, vous pouvez consulter notre politique de confidentialité disponible sur notre site internet.

LEGS2220

Reconnue d'utilité publique, Médecins Sans Frontières est habilitée à recevoir des legs, donations, assurances-vie exonérés de droits de succession.

MEDECINS SANS FRONTIERES | 50 ANS D'HUMANITÉ

14-34 avenue Jean-Jaurès 75019 Paris
https://leguez.msf.fr

ANDREW CULLEN/REUTERS

Dans le Dakota du Nord (États-Unis), des milliers de forages ont été réalisés pour extraire du gaz de schiste. En dix ans, ils ont couvert pas moins de 17 % de la surface de l'État, affectant cultures et environnement.

Énergie

La tentation du gaz de schiste

Avec la crise climatique et le conflit russo-ukrainien, le modèle américain d'exploitation massive du gaz de schiste interpelle : en vingt ans, le pays a presque atteint l'autosuffisance énergétique. Or, le sous-sol français pourrait également abriter d'importantes réserves. Des voix s'élèvent pour revenir sur l'interdiction de la prospection et de l'exploitation. Faut-il voir ce gaz comme une énergie révolutionnaire ou une dangereuse chimère ? Enquête.

Par Fabienne Copreaux

L'agression russe contre l'Ukraine, en février 2022, a ravivé le débat sur le gaz de schiste. Pour sortir de leur dépendance à la Russie et diversifier leurs sources d'approvisionnement, les pays européens se ruent en effet sur le gaz naturel liquéfié (GNL) américain. Stocké à -162 °C, celui-ci a l'énorme avantage de pouvoir être transporté par navire plutôt que par gazoduc, n'importe où, à condition de disposer de terminaux adaptés. La France comme l'Allemagne, la Finlande ou l'Estonie ont donc décidé d'investir dans de nouvelles infrastructures pour le recevoir, le stocker et lui faire reprendre sa forme gazeuse originelle afin de pouvoir l'injecter dans les réseaux de distribution. Or, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), ce GNL est issu pour environ 79 % de la transformation du gaz de schiste, interdit d'exploitation en Europe. Produit massivement outre-Atlantique depuis deux décennies, il a permis aux États-Unis de se hisser au premier rang des pays producteurs de gaz — devant la Russie et l'Arabie saoudite — et de s'acheminer vers l'autosuffisance énergétique. Face à la crise énergétique actuelle, la tentation est grande en Europe de revenir sur les interdictions passées. Les uns s'interrogent : plutôt que de l'acheter, ne vaudrait-il pas mieux essayer de le produire ? Les autres dénoncent un envers du décor ▸

ECOFLIGHT

Un paysage défiguré par le champ gazier Jonah, dans le Wyoming (États-Unis). La multiplication des puits de forage s'explique par le fait que leur production chute de 50 à 70 % dès la première année.

peu glorieux pour l'environnement, le climat planétaire et la santé humaine. Promesse d'une énergie abondante et bon marché ou dangereuse alternative, le gaz de schiste continue de nourrir la polémique.

Le gaz de schiste est en tout point semblable au gaz naturel : il s'agit essentiellement de méthane. Cet hydrocarbure de formule chimique CH_4 provient de la dégradation, durant des dizaines de millions d'années, de la matière organique piégée au sein d'une roche sédimentaire dite roche-mère. Lorsque celle-ci est poreuse et perméable, le gaz migre et s'accumule dans des réservoirs plus ou moins superficiels exploitables par des techniques conventionnelles (forage vertical). Mais il peut rester prisonnier d'une roche très peu perméable, généralement des argiles ou des marnes enfouies entre 1500 et 3000 mètres sous nos pieds, dans des pores nanométriques ne communiquant pas entre eux. Les Anglo-Saxons parlent de *shale gas* (gaz d'argile). Ce que l'on a traduit par « gaz de schiste », ce dernier mot étant à prendre dans son sens le plus large de roche sédimentaire litée à grains très fins, susceptible de se débiter en feuillets. Déloger ce gaz diffus au sein d'une roche très étendue et épaisse de plusieurs dizaines de mètres s'avère bien plus complexe et nécessite de combiner les deux techniques du forage dirigé et de la fracturation hydraulique. Concrètement, un puits plonge à la verticale dans la couche de « schiste » qui se prolonge ensuite à l'horizontale sur plusieurs kilomètres. Piégé dans les pores de la roche, le gaz ne peut remonter naturellement. La fracturation hydraulique (*fracking* en anglais) va l'y aider. Celle-ci consiste à injecter d'énormes volumes d'eau sous haute pression (300 à 600 bars) pour ouvrir sur quelques centaines de mètres de part et d'autre du puits un réseau de microfissures à travers lesquelles le méthane va pouvoir circuler plus facilement. Cette eau est mélangée à du sable, pour éviter que les fissures ne se referment, et à une multitude d'additifs (les « surfactants »), destinés à optimiser le processus. Parmi eux, des lubrifiants pour faciliter la pénétration du sable dans les fissures, des gélifiants et épaississants pour accroître la viscosité du fluide de fracturation, ou encore des biocides pour éliminer les bactéries susceptibles de corroder les équipements. La nature de ce cocktail chimique varie selon les caractéristiques du milieu à fracturer (profondeur, porosité, etc.). Une fois les opérations de fracturation terminées, les eaux usées (dites de reflux) sont en partie pompées et récupérées (jusqu'à 80 %). Elles peuvent alors être acheminées vers des stations d'épuration pour être dépolluées afin de pouvoir être utilisées en agriculture ou rejetées dans les cours d'eau. Mais le plus souvent, elles sont soit traitées localement par floculation et décantation dans des bassins et recyclées dans d'autres puits de forage, soit transportées par camion et réinjectées telles quelles dans le sous-sol, au sein de puits profonds voués à cet usage. Le gaz de schiste, lui, peut alors remonter vers la surface. Les taux de récupération, entre 20 et 40 %, restent largement inférieurs à ceux du gaz conventionnel (60 à 95 %) pour un coût de production en moyenne 20 % supérieur.

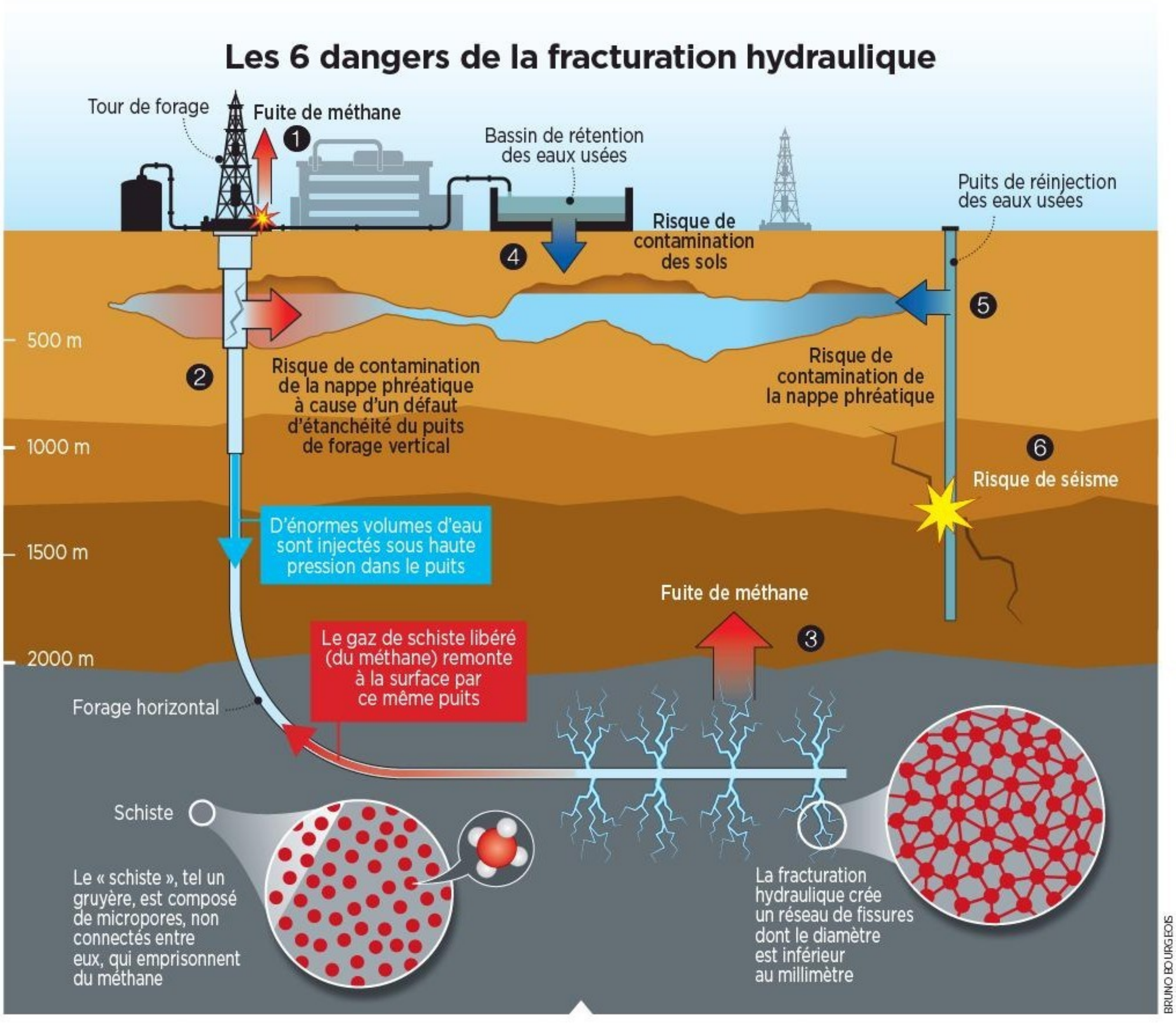
Des risques environnementaux et sanitaires qui inquiètent

Si le gaz de schiste est si décrié, c'est que son exploitation comporte (comme celle du gaz conventionnel) des risques avérés pour l'environnement et la santé humaine. D'abord, elle défigure les paysages. Chaque puits permet d'extraire le méthane sur quelques kilomètres carrés seulement de part et d'autre du forage horizontal, et s'épuise vite. La production des puits chute en effet très rapide-

THOMAS LAUVAUX

« Pour maintenir la production à un niveau constant, il faut sans cesse ouvrir de nouveaux puits »

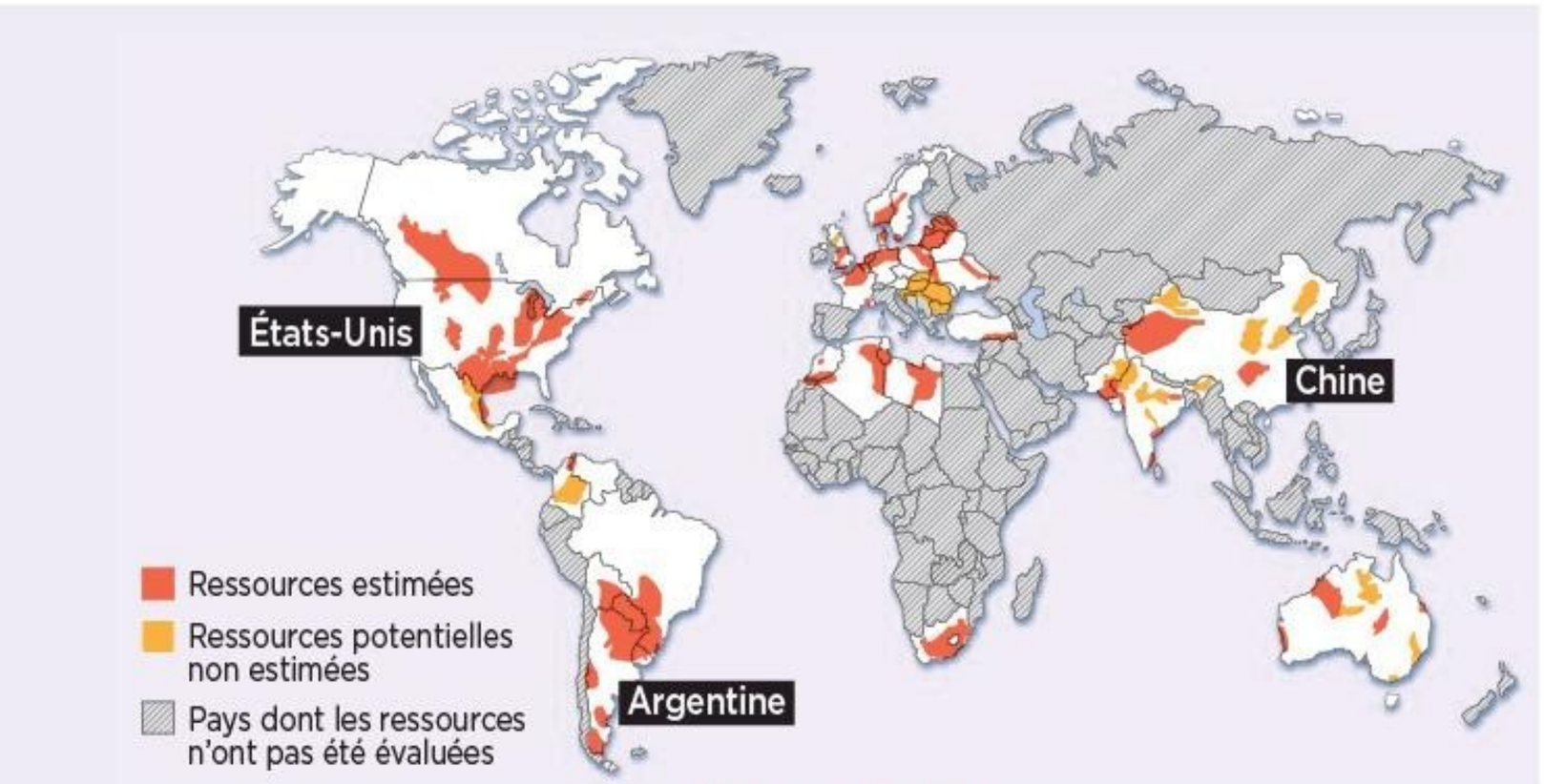
Thomas Lauvaux, professeur en sciences du climat à l'université de Reims Champagne-Ardenne



Des fuites de méthane peuvent provenir de défauts d'étanchéité des têtes de puits ❶ et des tubes de forage verticaux ❷ ainsi que de la fracturation elle-même ❸. D'autres dangers sont liés aux fuites d'eaux usées qui peuvent survenir lors de leur stockage ❹ ou de leur réinjection dans les sols ❺. Enfin, cette dernière technique augmente le risque de séisme ❻.

ment — de 50 à 70 % en moyenne — dès la première année, contre 10 % par an pour son équivalent conventionnel. *« Pour maintenir la production à un niveau constant, il faut donc sans cesse en ouvrir de nouveaux »*, relève Thomas Lauvaux, de l'université de Reims Champagne-Ardenne. Conséquence directe : les grandes plaines et les forêts de Pennsylvanie, du Texas ou du Dakota du Nord, aux États-Unis, sont grignotées sur des millions d'hectares par les puits, les gazoducs, la trame dense de routes d'accès et les énormes bassins de décantation, où l'eau remontée des profondeurs est traitée. Il en résulte une fragmentation accrue des milieux naturels, dommageable pour la biodiversité. Des études menées ces dernières années aux États-Unis ont montré que le morcellement des forêts induit par l'exploitation du gaz de schiste a, par exemple, des répercussions sur la distribution des passereaux nicheurs. Laura Farwell, de l'université du Wisconsin, et ses collègues ont suivi 27 espèces des bassins de Marcellus et d'Utica, dans le nord-ouest de la Virginie (1). Entre 2008 et 2017, les espèces synanthropes (vivant à proximité des humains) comme le vacher à tête brune (*Molothrus ater*) qui parasite les nids des autres oiseaux, sont devenues majoritaires à proximité des sites de forage. *A contrario*, les espèces forestières se sont raréfiées.

Les détracteurs dénoncent aussi les quantités phénoménales d'eau nécessaires à la fracturation : 10 000 à 15 000 m³ en moyenne par forage (soit trois à cinq piscines olympiques), au détriment des usages agricoles et résidentiels, même si une partie peut être récupérée et recyclée. Et, surtout, la contamination possible des nappes phréatiques et des eaux de surface. En 2013, une équipe américaine dirigée par Robert Jackson, de l'université Duke, a détecté du méthane dans 82 % des 141 puits utilisés par les familles vivant dans le bassin de Marcellus, au nord-est de la Pennsylvanie (2). Les puits situés à moins de 1 kilomètre d'un site d'extraction affichaient des concentrations six fois supérieures à la moyenne observée sur l'ensemble des puits. Elles dépassaient dans la majorité des cas 10 milligrammes de méthane par litre, le maximum acceptable selon les autorités américaines. Du propane et de l'éthane ont également été retrouvés. On sait aujourd'hui que ces contaminations sont dues, non pas à la fracturation hydraulique elle-même, mais à des défauts d'étanchéité du tubage en ciment et du cuvelage qui entourent le forage vertical. « *Techniquement, ces fuites sont en grande partie évitables à condition d'y mettre les moyens. Malheureusement, les entreprises recherchent avant tout la rentabilité. Le coût de production d'un puits se chiffre en millions de dollars. Obligés de multiplier leur nombre pour extraire une quantité de gaz à peu près constante dans le temps, à un prix compétitif par rapport au gaz conventionnel, ils ont tendance à limiter les dépenses, prenant moins de précautions, notamment lors de la réalisation des opérations de contrôle de l'étanchéité. Avec la crise actuelle, la ressource est devenue plus rare et le coût de production du gaz de schiste plus compétitif. Mais les puits déjà forés sont toujours là…* », note Gilles Pijaudier-Cabot, professeur à l'université de Pau et des Pays de l'Adour, et directeur du projet E2S (Energy Environment Solutions).



RESSOURCES

Des réserves bien réparties dans le monde

Alors que les réserves de gaz naturel conventionnel sont concentrées dans quelques pays, le gaz de schiste est présent un peu partout sur la planète. L'Agence internationale de l'énergie estime à environ 208 000 milliards de m³ le volume global techniquement récupérable à travers le monde, soit 32 % des réserves totales de gaz naturel. Chine, Argentine et États-Unis abritent les plus grosses réserves. En Europe, c'est la Pologne et la France qui arrivent en tête, avec environ 3900 milliards de m³. Mais il ne s'agit là que d'estimations. Dans l'Hexagone, les zones les plus prometteuses se situent dans le Sud-Est, entre Montélimar, Millau et Montpellier, dans le Bassin parisien et le Nord-Pas-de-Calais. Mais en l'absence de forages exploratoires, les quantités véritablement exploitables restent inconnues.

BRUNO BOURGEOIS

Les effets sur la santé sont de mieux en mieux documentés

Autre motif d'inquiétude : les dizaines voire centaines de substances chimiques injectées en profondeur lors de la fracturation hydraulique et qui peuvent venir elles aussi contaminer les eaux destinées à la consommation humaine. Ces contaminations sont le plus souvent accidentelles — les eaux de reflux peuvent par exemple déborder des bassins de rétention et se déverser *in fine* dans les cours d'eau, les camions les transportant vers les puits de réinjection se renverser, etc. — et ne font pas l'objet de déclarations obligatoires. « *Le problème est qu'aucune loi fédérale n'oblige pour l'instant les exploitants à révéler la nature des additifs utilisés, au nom du secret industriel* », pointe la toxicologue américaine Linda Birnbaum, ancienne directrice du National Institute of Environmental Health Sciences. En septembre 2022, l'Association des médecins pour une responsabilité civile (Physicians for social responsibility) a ainsi révélé qu'au Colorado et dans l'Ohio, certaines compagnies utilisent depuis des années des per- et polyfluoroalkyles (ou PFAS) — surnommés « polluants éternels » — et ce, avec l'aval de l'Agence de protection de l'environne-

D.GOUPY/SIGNATURES

« Techniquement, les fuites de gaz sont en grande partie évitables à condition d'y mettre les moyens »

Gilles Pijaudier-Cabot, professeur à l'université de Pau et des Pays de l'Adour et directeur du projet E2S (Energy Environment Solutions)

ment. Or *« ces substances sont associées, même à très faible concentration, à une multitude d'effets sur la santé : dégradation du système immunitaire, perturbations endocriniennes, hypertension pendant la grossesse, risques accrus de cancers, etc. »*, énumère Linda Birnbaum. Le tableau se noircit encore lorsqu'on ajoute les sels (chlorures, bromures), les métaux lourds et radioactifs présents naturellement dans les roches-mères argileuses et marneuses (uranium, thorium, arsenic, césium…) qui peuvent être lessivés par le fluide de fracturation et polluer les eaux.

Les effets sur la santé de l'exploitation du gaz de schiste sont de mieux en mieux documentés. Et apparaissent multiples : naissances prématurées et faible poids des nouveau-nés, asthme, dérèglements du système hormonal, cancers… Une étude menée en Pennsylvanie par Cassandra Clark du Yale Cancer Center et ses collègues vient de montrer que les enfants vivant à moins de deux kilomètres d'un site de fracturation sont deux fois plus susceptibles de développer une leucémie aiguë lymphoblastique, le cancer pédiatrique le plus fréquent, que ceux résidant au-delà (3). Et le risque triple s'ils ont été exposés *in utero*. Pour arriver à ce résultat, les chercheurs ont analysé les dossiers médicaux de 2500 enfants de 2 à 7 ans, dont 405 diagnostiqués pour cette pathologie entre 2009 et 2017.

Des émissions de gaz à effet de serre plus élevées que prévu

À cet impact environnemental et sanitaire direct s'ajoute un autre, indirect et mondial, au travers des émissions de méthane dans l'atmosphère. Les études menées cette dernière décennie l'attestent : de petites quantités de ce gaz à effet de serre, doté d'un pouvoir réchauffant sur cent ans près de 30 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone, s'échappent en continu par les têtes de puits en raison de défauts d'étanchéité. Des estimations faites en 2015 ont montré que le seul bassin texan de Barnett en perdait quelque 544 000 tonnes par an (l'équivalent de la combustion d'environ 20 millions de tonnes de charbon). Mais ce n'est pas tout. En France, la récente étude pilotée par le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement et la société Kayrros a mis en évidence des émissions de méthane bien plus importantes encore, liées aux opérations de maintenance ou aux rejets accidentels des exploitations (4). *« Longtemps, les gaziers ont nié leur existence. Et la rareté des observations ne permettait pas de vérifier. Mais l'analyse des images produites quotidiennement par le satellite Sentinel-5P de l'Agence spatiale européenne de 2019 à 2020 nous raconte une autre histoire,* explique Thomas Lauvaux, premier auteur de l'étude. *Sur cette période, nous avons identifié quelque 1500 énormes lâchers de méthane, dont une majorité aux États-Unis. Et c'est un minimum, ce satellite ne voyant ni à travers les nuages ni partout sur le globe. Le plus souvent aléatoires, ces lâchers*

JIM WEST/REPORTDIGITAL-REA

À proximité des maisons, le forage (ici, dans le Colorado) provoque notamment des risques de pollution de l'eau potable.

SARAH CRAIG/FACES OF FRACKING

Le fluide de fracturation et d'autres déchets de forage sont déversés dans cette fosse, dans le comté de Kern, en Californie.

se produisent en général sur un ou deux jours : les vannes sont ouvertes le temps des opérations de maintenance et plusieurs dizaines de tonnes de gaz s'évaporent dans l'atmosphère. »

Le secteur a pourtant tout intérêt à limiter ces fuites volontaires. « *Selon nos calculs, les coûts des réparations, du stockage du gaz dans un réservoir ou de la mise en place d'un tuyau de dérivation le temps de ces réparations seraient largement compensés par les bénéfices tirés de la vente du gaz préservé. Mais n'ayant aucune obligation légale de limiter leurs émissions, les gaziers choisissent la facilité,* insiste le scientifique. *Il est probable que les émissions globales soient au final deux ou trois fois supérieures aux inventaires officiels de l'Agence américaine de protection de l'environnement, fondés sur des estimations.* »

Cela met à mal l'argument faisant de cet hydrocarbure un carburant de transition vers une économie neutre en carbone. « *Même si nous manquons de chiffres précis, le bilan de la filière aux États-Unis reste probablement inférieur à celui de la filière charbon, mais pas de moitié comme on l'affirme souvent, plutôt de l'ordre du tiers. Ailleurs, au Turkménistan par exemple, où les fuites sont plus massives encore, les bilans des deux filières sont probablement du même ordre de grandeur* », estime Thomas Lauvaux.

Les pays européens ont banni pour la plupart l'exploitation de gaz de schiste : la France en 2011, le Danemark et la Bulgarie en 2012, les Pays-Bas en 2015 et l'Allemagne en 2017. D'autres, comme la Norvège et la Suède, ont considéré cette technique non viable sur le plan économique. Mais, avec la crise climatique et énergétique, le modèle américain fait des émules. Est-il pour autant viable ailleurs ? Rien n'est moins sûr. Des investissements colossaux ont été consentis pour en arriver là. Pour les rentabiliser, des secteurs industriels entiers se sont convertis. Les centrales électriques ont ainsi délaissé le charbon pour cette nouvelle source de gaz bon marché. L'industrie pétrochimique produit l'éthylène non plus à partir du naphta, mais de l'éthane issu du gaz de schiste. Mais cela s'est fait au détriment des énergies renouvelables, dont le développement a été stoppé net. « *La guerre en Ukraine offre aux États-Unis l'opportunité de relancer les explorations et la production afin de répondre à la demande européenne. Et cela va se faire au détriment du climat, puisque le bilan carbone va nécessairement croître pour liquéfier le gaz, l'acheminer en bateau, le regazéifier* », prévient Thomas Lauvaux.

ALBERT FACELLY / DIVERGENCE

Manifestation en France contre l'exploitation du gaz de schiste et le traité de libre-échange transatlantique, en 2014.

Exploitation et exploration sont interdites en France depuis 2011

En évitant ces étapes très énergivores, une production locale permettrait d'atténuer la facture. Encore faudrait-il connaître les réserves utiles, c'est-à-dire exploitables à un coût compétitif. En France, cela est tout bonnement impossible puisque la loi Jacob du 13 juillet 2011, confirmée par le Conseil constitutionnel le 11 octobre 2013, interdit l'usage de la fracturation hydraulique pour l'exploitation du gaz de schiste comme pour l'exploration. « *Or, celle-ci est indispensable à la connaissance de notre sous-sol. Cette interdiction est injuste et hypocrite puisqu'elle ne nous empêche pas d'en importer des États-Unis* », regrette Thierry Bros, professeur à Sciences Po Paris et spécialiste des questions gazières. Si les réserves étaient au rendez-vous, cela ne signifie pas pour autant qu'elles seraient exploitables ni rentables qui plus est, à très courte échéance. « *La Pologne, par exemple, a fait marche arrière en 2015 à la suite des forages exploratoires et de la révision à la baisse des estimations américaines* », poursuit l'expert. Pour lui, bien que les impacts sur l'environnement et la santé soient indéniables, toute source d'énergie a son ▶

GÉOPHYSIQUE

Des risques sismiques avérés

L'Institut de géophysique américain a fait le lien entre la réinjection dans le sous-sol des eaux usées issues de la fracturation hydraulique et la hausse significative du nombre de séismes dans certaines régions des États-Unis. Dans l'Oklahoma par exemple, le nombre de secousses de magnitude supérieure ou égale à 3 est passé de moins de deux par an avant 2009 à plus de 900 en 2015. Si la plupart sont à peine ressenties par les populations, d'autres occasionnent des dégâts matériels (murs lézardés, effondrés, fenêtres désaxées…). C'est le cas par exemple du séisme de magnitude 5,6 qui a touché la ville de Prague (Oklahoma) en 2011 ou de celui de magnitude 5 au Texas, qui, en mars 2020, a été ressenti jusqu'à El Paso, à plus de 280 km de son épicentre. L'injection des eaux usées dans le sous-sol modifie la répartition des contraintes s'exerçant le long des failles avoisinantes, augmentant la probabilité d'une rupture.

18 millions d'Américains vivent à moins d'un mile (1,6 kilomètre) d'un puits de forage (ici près de Lost Hills, en Californie).

DAVID MCNEW/GETTY IMAGES VIA AFP

VU DES ÉTATS-UNIS

L'illusion d'un consensus

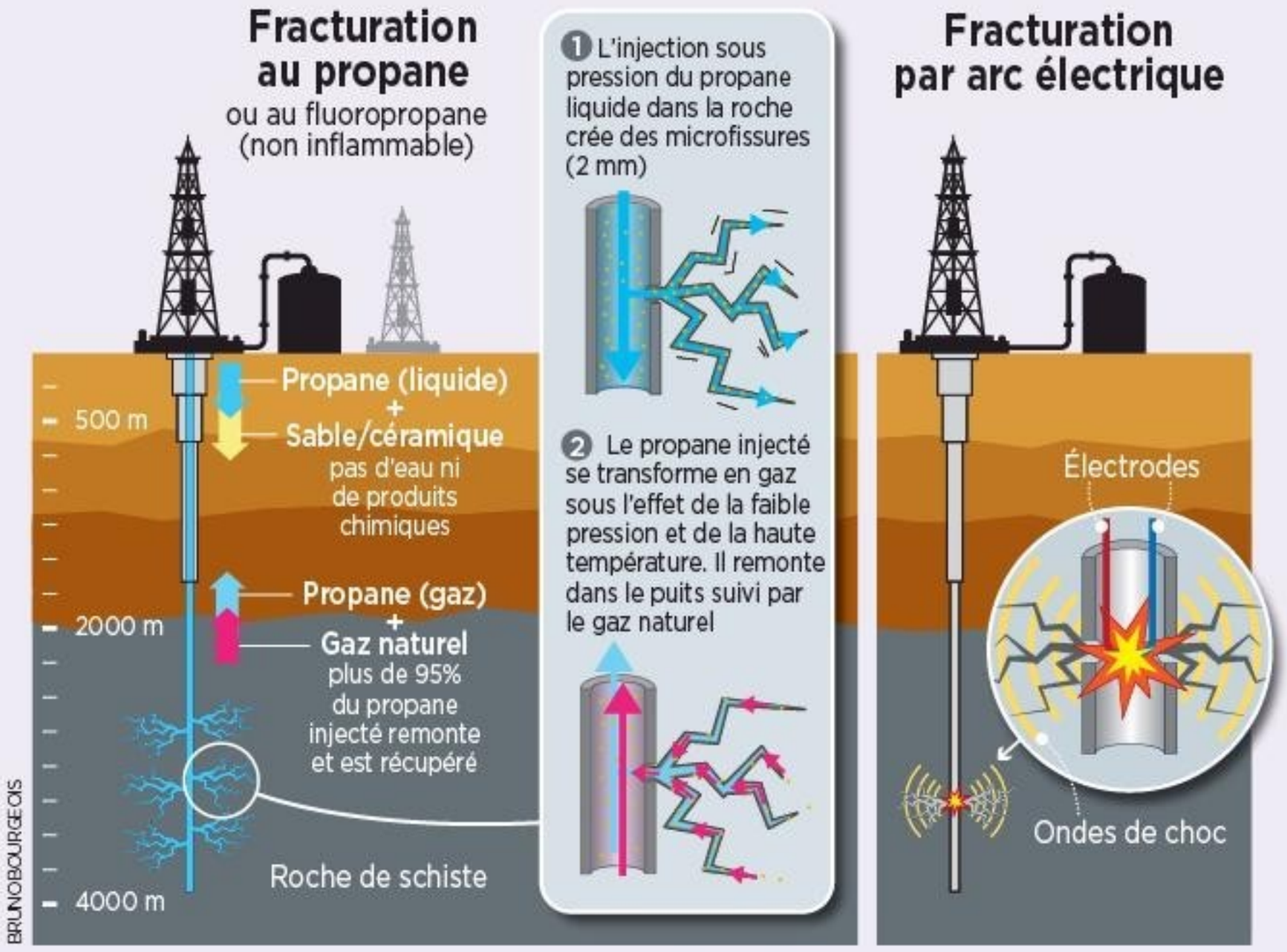
Deux candidats : un républicain, un démocrate. Les deux étaient dans le passé hostiles au gaz de schiste. Le républicain, médecin célèbre, recommandait aux femmes enceintes vivant près des puits de ne pas boire l'eau du robinet ; le second, gouverneur adjoint de son État, se vantait en 2016 de *« ne pas soutenir et n'avoir jamais été en faveur du* fracking ». Aux élections de novembre 2022, pourtant, ces deux hommes qui se disputaient le poste de gouverneur de Pennsylvanie, aux États-Unis, ont tourné casaque : ils soutenaient tous deux le gaz de schiste. Logique ? Le *fracking* (fracturation hydraulique) fournit des milliers d'emplois en Pennsylvanie, et la guerre en Ukraine est venue rappeler aux Américains l'importance stratégique et économique du gaz de schiste. Près de 80 % du gaz naturel, qui assure 40 % de la production d'électricité nationale, provient du *fracking*, et quelque 18 millions d'Américains vivent à moins d'un mile (1,6 kilomètre) d'un puits. L'industrie est plus profitable que jamais : après une année 2022 record, qui a vu le gaz et le pétrole dégager 156 milliards de dollars (environ 144 millards d'euros) de trésorerie disponible, 2023 devrait encore être un grand cru, avec 120 milliards de dollars (environ 110 milliards d'euros), selon le consultant Rystad Energy.

Pourtant, ce tableau consensuel est trompeur. Si les deux candidats ont soutenu le gaz de schiste en Pennsylvanie, c'est qu'ils courtisaient l'électorat masculin blanc. À l'échelle de l'ensemble de ses habitants, la Pennsylvanie reste très clivée : 48 % sont favorables au *fracking*, 44 % y sont hostiles, selon un sondage du Muhlenberg College de mai 2022. Les préoccupations à l'égard des risques sanitaires du gaz de schiste ont même augmenté : ils sont 67 %, soit 5 % de plus qu'en 2014, à se dire *« très »* ou *« plutôt »* convaincus que cette technique d'extraction minière *« représente un risque majeur pour les ressources en eau de l'État. »* Dans les États démocrates, l'opposition au *fracking* est généralement acquise, même si le sujet est un peu passé à l'arrière-plan. En Californie, une proposition de référendum interdisant cette technique n'a pas recueilli un nombre suffisant de signatures pour être soumis au vote.

Dans les États producteurs de gaz de schiste, les controverses et actions en justice sont nombreuses

Dans les États producteurs de gaz de schiste, les controverses et actions en justice sont nombreuses, portant sur des risques tels que les secousses sismiques (qui ont augmenté en Oklahoma et au Texas) ou la qualité de l'eau. Même s'agissant de l'aspect économique du *fracking*, tout n'est pas au beau fixe. Les profits mirobolants d'aujourd'hui n'ont pas fait oublier les pertes abyssales de l'industrie, jusqu'à tout récemment (300 milliards de dollars, soit quelque 276 milliards d'euros, de 2010 à 2020). La profitabilité actuelle des industriels s'explique d'ailleurs par leur grande prudence : redoutant un retournement du marché et des prix, ils hésitent beaucoup à investir dans de nouvelles capacités d'extraction. ■

À New York,
Philippe Boulet-Gercourt



ALTERNATIVES

Des techniques pour fissurer la roche autrement

Ces dix dernières années, des alternatives à la fracturation hydraulique ont été développées, au premier rang desquelles figurent la fracturation au gaz ou par arc électrique. La première technique consiste à remplacer l'eau par du propane (C_3H_8) ou par sa version non inflammable, le fluoropropane (C_3H_7F), deux gaz qui, compressés, sont sous forme liquide. Avantage : ils remontent sous forme gazeuse avec le méthane extrait et sont récupérables à plus de 95 %.
Ce type de fracturation ne nécessite en outre pas d'additifs chimiques.
Le principe de la fracturation par arc électrique est tout autre. Il s'agit d'envoyer une décharge électrique dans le puits de forage rempli d'eau, grâce à deux électrodes. Laquelle crée une onde de choc qui fissure la roche-mère. « *Explorée à Pau durant les années 2000 par notre laboratoire, cette technique simple a été expérimentée sur un puits, mais elle reste difficile à mettre en œuvre à grande échelle,* précise Gilles Pijaudier-Cabot, directeur du projet E2S. *Toutefois, aucune de ces approches n'est aussi performante ni rentable économiquement que la fracturation hydraulique. Le volume de roche accessible à l'extraction de gaz est en effet fonction de la longueur des fissures induites par la fracturation. Et cette longueur est plus grande avec la fracturation hydraulique (une centaine de mètres) qu'avec les autres techniques (quelques mètres pour la fracturation électrique). Si bien que la priorité n'est pas de la remplacer mais de l'améliorer, de comprendre les phénomènes à l'œuvre en profondeur, la façon dont se propagent les microfissures, etc., afin de l'optimiser et d'éviter les accidents (connexion de la fracture à un aquifère, à une couche très perméable, etc.). Un choix industriel logique en matière de retour sur investissement et de prise de risque lié à l'innovation.* »

revers. « *Que ce soit le nucléaire avec ses déchets, l'éolien avec ses besoins en terres rares et son intermittence, le charbon dont la combustion génère de grosses quantités de dioxyde de carbone, etc. Je ne connais pas d'énergie qui soit dénuée de problème. La question est de savoir si nous acceptons de vivre dans le froid et le noir.* »

Une industrie particulièrement gourmande en eau

Gilles Pijaudier-Cabot estime pour sa part qu'une exploitation du gaz de schiste en France, et plus généralement en Europe, est difficilement envisageable. « *Une grande partie des conséquences évoquées sur l'environnement et la santé est liée à la démultiplication des puits et aux impératifs de rentabilité qui font qu'on les fore à moindre coût. Elles pourraient donc être mieux maîtrisées. En revanche, je suis convaincu que l'emprise au sol de ces puits serait insupportable dans des zones densément peuplées comme le Bassin parisien, par exemple.* »
Sans compter les conflits potentiels d'usages autour de l'eau. Plusieurs villes du Texas ont vu leurs sources s'assécher à cause de l'exploitation du gaz de schiste. Et après la sécheresse historique que l'Hexagone a connue en 2022, il n'est pas certain que la population accepte le développement d'une industrie particulièrement gourmande en eau… Pour Thomas Lauvaux, la vraie question est celle de notre dépendance aux énergies fossiles. « *Le risque est qu'un recours massif au gaz de schiste nous empêche d'enclencher une véritable transition énergétique.* » Celle-ci est en effet la seule voie pour tenir nos engagements de baisser de 55 % nos émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030 avant d'atteindre la neutralité carbone à la moitié du siècle. ■

(1) L. Farwell et al., *The Condor*, 121(3), 1er août 2019.
(2) R. Jackson et al., *PNAS*, 9 juillet 2013.
(3) C. Clarck et al., *Environmental Health Perspectives*, 130(8), août 2022.
(4) T. Lauvaux et al., *Science*, 375(6580), 4 février 2022.

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs chaque jeudi de 17H30 à 19H sur https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

Une molécule photosensible pour remplacer le glyphosate

Un chercheur a développé un désherbant qui détruirait sélectivement les mauvaises herbes sans nuire aux plantes d'intérêt économique. Une alternative aux produits phytosanitaires conventionnels connus pour être toxiques pour la santé humaine, animale et environnementale.

« *Cela pourrait être une révolution dans le monde de l'agriculture !* » Mohamad Issaoui, docteur en sciences agronomiques et écologiques, ne manque pas d'ambition pour sa découverte. Dans le laboratoire Labcis de l'université de Limoges (Haute-Vienne), le chercheur d'origine libanaise affirme avoir mis au point un substitut aux produits phytosanitaires conventionnels comme le glyphosate. Activé sous l'effet de la lumière, il détruit les « mauvaises herbes » (plantes adventices) sans nuire aux plantes d'intérêt économique. Une découverte qui lui a valu de remporter en novembre 2022 un prix Falling Walls Lab — du nom du grand rassemblement scientifique qui se tient tous les ans à Berlin (Allemagne). C'est au cours de sa thèse que l'idée a germé chez le chercheur : « *En appliquant certaines molécules photo-activables sur des tomates et des plantes adventices comme les* Arabidopsis, *j'ai vu qu'elles n'attaquaient pas les deux plants de la même manière. Avec une exposition à la lumière naturelle, ces molécules créent un stress oxydatif qui induit la mort des cellules végétales des mauvaises herbes mais pas des tomates, car elles produisent plus d'antioxydants.* »

La destruction s'opère grâce à des mécanismes d'oxydation

Il est alors parti en quête des molécules les plus efficaces. Dès 2015, les premiers essais *in vitro*, réalisés à l'université de Limoges, permettent d'en sélectionner deux : l'une naturelle, l'autre synthétisée en laboratoire avec d'autres photosensibilisateurs déjà répertoriés. Contrairement au glyphosate, elles agissent de façon sélective selon les plantes. « *Le glyphosate inhibe une enzyme permettant la synthèse des protéines, ce qui conduit à la mort de toutes les plantes* », explique Mohamad Issaoui. Au laboratoire, il confirme qu'avec ses molécules photo-activables, les adventices sont tuées alors que les cellules de tomate ou de vigne résistent.

Selon Xavier Reboud, chercheur en

FINANCEMENTS

Le long chemin vers la commercialisation

Pour commercialiser son invention, Mohamad Issaoui a créé en 2021, dans les locaux d'Ester Technopole à Limoges, la société AgroDynaLux, accompagné de Holm Amara, ingénieure en biologie industrielle. « *Après avoir investi nos fonds propres, nous avons reçu plusieurs financements publics, des subventions et des prêts, notamment de la Banque publique d'investissement. Et nous avons aussi remporté un prix du dispositif Pépite, avec 400 000 euros à la clé* », détaille la chercheuse. Pour mener à bien les essais réglementaires, c'est un million d'euros qu'il faudrait lever dans un premier temps. « *Il y a de nombreux tests, comme pour un médicament, avec des laboratoires agréés qui sont supervisés par l'Anses* [l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail]. *Il faut étudier la toxicité, l'écotoxicité, les résidus, les métabolismes… En général, ça peut prendre dix ans* », poursuit la jeune scientifique.

AGRODYNALUX

Exposées à la lumière naturelle, les nouvelles molécules tuent sélectivement les mauvaises herbes sans nuire aux autres plantes (ici testées sous serre par le chercheur Mohamad Issaoui).

agroécologie à l'Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) et coordinateur en 2017 d'un rapport sur les alternatives au glyphosate, *« le mécanisme n'est pas nouveau : il consiste à détruire les tissus végétaux par des mécanismes d'oxydation, à la manière de ce que font les produits dits dessiccants comme le Diquat et le Paraquat. Mais ceux-là ont été retirés du marché car ils ont une activité oxydative qui ne se limite pas seulement aux plantes. Ici, l'idée de cibler l'action herbicide est intéressante à condition d'avoir la certitude qu'elle ne s'exprime pas sur d'autres plantes. Sans oublier la question du devenir de cette molécule dans l'environnement. »* Sur ce dernier point, Mohamad Issaoui avance que les molécules sont biodégradables et photodégradables en deux semaines : *« Elles se décomposent sous l'action de la lumière et des micro-organismes »*. Avec toutefois un bémol : *« On ne sait pas encore en quels composés »*, admet-il. Menées depuis 2021, des observations sous serre se poursuivent sur huit plantes (tomate, maïs, orge, blé, tournesol, oignon, navet, épinard) et huit mauvaises herbes. *« Les molécules photo-activables n'ont eu aucun effet sur les plantes d'intérêt économique, sauf un peu sur l'épinard car sa structure est très fragile. Les plantes adventices, elles, sont bien détruites. Seul le pissenlit résiste, mais une inhibition de la croissance peut suffire à le réduire »*, résume Mohamad Issaoui.

Les résultats des essais en plein champ connus cette année

Reste à confirmer avec des essais en plein champ. Depuis septembre 2022, ces molécules sont testées dans une solution pulvérisée sur des plants de pommes de terre et de blé d'hiver cultivés dans une vingtaine de parcelles de 100 m² situées dans 15 départements. *« C'est une étape importante car le vent et l'humidité peuvent modifier les résultats. Ça nous permet de calibrer les dosages et de déterminer s'il y a nécessité de combiner les molécules avec d'autres éléments. »* Les résultats sont attendus dans le courant de cette année.

Pour Xavier Reboud, ce changement d'échelle ne devrait pas constituer un réel obstacle, mais permettra de mieux cerner le potentiel de cette approche. *« Chaque espèce cultivée a, en général, une apparentée sauvage assez proche se comportant comme une mauvaise herbe. Ce qui peut donc laisser penser que certaines familles botaniques ne vont pas être touchées. Par exemple, certaines plantes adventices de la famille de la tomate comme la morelle noire présentent des caractères similaires et pourraient donc elles aussi résister. Il y a encore de nombreuses précisions à apporter pour représenter une réelle alternative au glyphosate. Personne n'en a encore trouvé. Le chemin reste encore long. »* Et les espoirs grands. ■

Alix Vermande

Avec ces molécules photo-activables, les adventices sont tuées alors que les cellules de tomate ou de vigne résistent

JULIEN HELAINE/HANS LUCAS

L'éco-anxiété chez les jeunes générations se traduit majoritairement par un sentiment de colère qui les pousse à s'investir dans des actions de lutte contre le changement climatique (ici manifestation à Paris en 2019 à l'occasion de la grève mondiale pour le climat).

Éco-anxiété

Quand les maux de la planète font souffrir

De la colère, de la tristesse, de la culpabilité… Les éco-anxieux éprouvent une multitude d'émotions. Ils sont plus lucides que malades, estiment psychologues et psychiatres, mais leur souffrance est réelle. Combien sont-ils ? Comment les soulager ? La recherche médicale apporte les premières réponses.

Par Cécile Coumau @ cecilecoumau

Le changement climatique inquiète, effraie, désespère. « *Quelques semaines après la publication d'un nouveau rapport du Giec ou après l'organisation d'une COP, la souffrance des éco-anxieux a tendance à être plus aiguë, au point que certains viennent consulter* », avertit le Pr Antoine Pelissolo, psychiatre et auteur des *Émotions du dérèglement climatique* (Flammarion, 2021). En janvier, patrons de multinationales, grands banquiers et autres puissants responsables politiques du monde entier, réunis au Forum économique mondial de Davos, en Suisse, ont classé la crise du coût de la vie à la première place de leurs préoccupations, reléguant au second plan les conséquences du réchauffement climatique. De quoi redoubler l'éco-anxiété des personnes de plus en plus nombreuses qui déplorent l'inertie de la société ?

Ce phénomène nouveau intéresse les scientifiques. Comme le mentionne le Dr Claire Galais, auteure en 2021 d'une thèse sur le sujet, « *le nombre d'articles publiés sur ces sujets dans des revues scientifiques a triplé entre 2007 et 2017* » et l'intérêt ne cesse de grandir depuis. Même si les données sont encore parcellaires, une très large étude publiée en 2021 dans *The Lancet Planetary Health*, qui s'appuyait sur un sondage réalisé auprès de 10 000 jeunes issus de dix pays, a révélé que 59 % des sondés se disaient « *très* » ou « *extrêmement inquiets* » du changement climatique. Plus frappant encore : 45 % ont déclaré que leur éco-anxiété affectait négativement leur vie quotidienne. Quant à savoir combien souffrent ▸

d'une éco-anxiété pathologique, *« certaines études atteignent des taux de 10 % »*, lâche Tobias Brosch, directeur du groupe de recherche en psychologie du développement durable à l'université de Genève (Suisse).

Aucun milieu social ne serait protégé

Le phénomène serait donc massif, et contrairement à une idée reçue, *« les éco-anxieux n'ont pas forcément d'antécédents d'anxiété pathologique »*, prévient Antoine Pelissolo. *« J'ai reçu des personnes en consultation qui avaient un socle très solide et qui se sont effondrées complètement »*, confirme Charline Schmerber, psychologue spécialiste des éco-émotions. D'après la fréquentation de leurs cabinets, psychiatres et psychologues suggèrent que les jeunes sont plus affectés. Dans l'étude du *Lancet*, 39 % déclarent hésiter à avoir des enfants et Antoine Pelissolo a même vu *« des jeunes activistes qui s'étaient fait stériliser. »* Pédopsychiatre, chercheuse à l'université Yale (États-Unis) et à l'Inserm, Laelia Benoit a mené l'enquête auprès des 7-18 ans aux États-Unis, en France et au Brésil. Les premiers résultats publiés en décembre 2022 sont plutôt « rassurants ». Les enfants éprouvent des émotions très négatives mais qui ne les empêchent pas de vivre. C'est sans doute parce que les plus jeunes ont moins de dissonances cognitives que les adultes qui ne se sentent pas très fiers quand ils agissent en contradiction avec leurs convictions. Par ailleurs, la chercheuse a observé que le réchauffement climatique provoquait de la tristesse dans l'enfance, la colère et la culpabilité faisant leur apparition à l'adolescence. Aucun milieu social ne serait protégé. Les jeunes Américains et Brésiliens appartenant à des minorités *« ont conscience qu'ils seront laissés pour compte en cas d'épisodes climatiques extrêmes. »*

Des recherches sont menées pour repérer des facteurs de risque. Ceux qui ont déjà été victimes d'épisodes climatiques dramatiques, à l'instar des Inuits *(lire l'encadré ci-dessous)*, sont logiquement plus fragiles. Mais, inutile d'être confronté directement à une catastrophe pour souffrir. Une étude parue en 2018 dans *Proceedings of the National Academy of Sciences* concluait qu'un réchauffement de 1 °C entraînait une hausse de 2 % de la fréquence des problèmes de santé mentale. Être très informé constitue aussi un facteur de risque. Résultat : *« Les climatologues éprouvent une plus grande intensité émotionnelle à l'égard du changement climatique que la population générale et même que les étudiants »*, concluent des chercheurs australiens ayant étudié la littérature scientifique (*Global Environmental Change*, 2018). *« Les chercheurs du Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) ont même sollicité la médecine du travail pour que leur éco-anxiété soit prise en compte »*, relate Hélène Jalin, du Laboratoire de psychologie des Pays de la Loire.

Pour comprendre qui sont les « écoanxieux », reste à bien définir ce que recouvre l'écoanxiété. Or, aucune définition officielle ne fait pour le moment consensus. Pour l'Association américaine de psychologie, cette contraction

ENVIRONNEMENT ET MODE DE VIE

Premières victimes, les Inuits

Moins de neige, des caribous en voie de disparition… L'extrême nord du Canada est l'une des régions du monde qui se réchauffent le plus rapidement. Résultat *: « les Inuits ont été la première communauté à vivre une détresse mentale et une perte d'identité culturelle à cause de la transformation de leur écosystème »*, estime la chercheuse Ashlee Cunsolo, auteure d'un rapport de l'ONU sur les conséquences du réchauffement en matière de santé. Dans une communauté où les taux de suicide sont de 5 à 25 fois plus élevés que dans le reste du pays, se sentir « coincé » par des conditions climatiques ne permettant plus de *« participer aux pratiques de subsistance »* suscite des *« réactions telles que la frustration, la colère, la détresse, l'anxiété et la dépression »*. L'identité des Inuits étant liée à la terre, *« même des altérations subtiles ont des implications directes et indirectes sur le bien-être personnel et la compréhension de sa place dans le monde. »*

ACACIA JOHNSON

Le réchauffement du climat dans l'extrême-nord du Canada, en modifiant l'écosystème, a entraîné une perte d'identité culturelle chez les Inuits.

des termes écologie et anxiété peut se résumer à *« une peur chronique d'un cataclysme environnemental qui provient de l'observation de l'impact apparemment irrévocable du changement climatique et de l'inquiétude associée pour son propre avenir et celui des prochaines générations »*. La formulation de Panu Pihkala, chercheur à l'université d'Helsinki en Finlande, est également souvent reprise : l'éco-anxiété est *« le sentiment généralisé que les fondements écologiques de l'existence sont en train de s'effondrer »*.

Une échelle pour évaluer l'intensité de la souffrance

Mal défini, le terme éco-anxiété est de plus réducteur, selon les premiers travaux réalisés sur le sujet. Le panel d'émotions générées par le changement climatique est tellement large que Panu Pihkala a publié une taxonomie dans la revue *Frontiers* en 2022. Les éco-émotions les plus fréquemment mentionnées dans les études sont la peur, la colère, l'inquiétude, l'anxiété, la tristesse, le chagrin, la culpabilité, la honte, le désespoir et la culpabilité. Viennent ensuite le sentiment d'impuissance, la surprise, le dégoût, mais aussi des émotions positives telles que l'envie urgente d'agir, la fierté ou encore la gratitude. Certains signes d'ordre cognitif, tels que les ruminations, sont aussi caractéristiques de l'éco-anxiété. Enfin, des symptômes physiques peuvent découler des émotions : insomnies, crises d'angoisse, troubles alimentaires… L'intensité de ces signes est variable selon les individus et selon les moments de la vie. Des spécialistes comme Charline Schmerber estiment que *« chez certaines personnes, la prise de conscience est brutale. Ce sont les éco-anxieux que je classifie comme ayant un éveil écologique traumatogène. »* Parfois, la prise de conscience est progressive mais *« la crise environnementale a provoqué un épuisement de leurs capacités cognitives. Ils sont en burn-out écologique. »*

Les soignants ne le nient pas : la souffrance des écoanxieux est réelle. *« Les psys que nous sommes en sont témoins et nous devons alerter »*, lance Laelia Benoit. Pourtant, la prise en charge est difficile, car tous les spécialistes sont d'accord : les éco-anxieux ne sont pas malades. Selon la médecin généraliste Claire Galais, *« on devrait plutôt les appeler des éco-lucides »*. Autrement dit, leur réaction est « rationnelle » au vu du dérèglement climatique qui frappe la planète. Tobias Brosch tient à rappeler que *« les émotions sont là pour indiquer qu'il y a un problème. Pour la plupart des gens, se sentir anxieux par rapport au changement climatique n'a rien d'un problème clinique »*.

Les soignants doivent donc en premier lieu évaluer l'intensité de la souffrance. Pour cela, des chercheurs anglo-saxons ont mis au point des échelles (échelles de Clayton, de Hogg), qui se distinguent des outils de mesure classiques de l'anxiété traditionnelle. Celle de Hogg porte par exemple à la fois sur les signes cognitifs (*« Au cours des deux dernières semaines, à quelle fréquence avez-vous été incapable d'arrêter de penser aux changements climatiques futurs ? »*), sur les répercussions fonctionnelles (difficul- ▸

UNIVERSITY OF OREGON

DÉCRYPTAGE

ELLEN PETERS

DIRECTRICE DU CENTER FOR SCIENCE COMMUNICATION RESEARCH, UNIVERSITÉ D'OREGON (ÉTATS-UNIS)

Raconter des histoires plutôt que d'égrainer des chiffres

“La communication n'a pas bien réussi à nous faire prendre conscience des effets du changement climatique sur la santé. Et elle a pu être anxiogène parce qu'elle a eu le tort de se concentrer sur les impacts abstraits à long terme (par exemple, l'augmentation lente des températures et du niveau des mers). Mais 2 degrés ne signifient pas grand-chose pour la plupart des gens. Quant aux images d'ours polaires, elles peuvent donner aux gens un sentiment de désespoir et l'impression qu'il n'y a rien à faire. C'est pourquoi avec des chercheurs de l'université Harvard et du Massachusetts General Hospital (États-Unis), nous avons établi des conseils, fondés sur la recherche, pour mieux communiquer. Il faut notamment que les messages proviennent de sources fiables parce que les valeurs et l'identité des gens influencent les personnes en qui ils ont confiance et la manière dont ils font leurs choix. Le recours aux images et aux vidéos attire l'attention et induit des réponses émotionnelles plus fortes que les mots seuls, ce qui incite les gens à agir. L'imagerie visuelle aide également notre cerveau à comprendre les associations abstraites et complexes, comme celles entre le climat et la santé. La communication narrative est également importante pour combler le fossé entre la santé et le changement climatique. Les histoires - que les scientifiques appellent des récits - sont plus pertinentes que les statistiques et les faits. Elles suscitent des émotions et nous aident à modifier nos croyances… et nos comportements.”

Propos recueillis par C. C.

tés à travailler, à dormir…) mais aussi sur le rôle de chacun dans cette crise (« *à quelle fréquence avez-vous éprouvé un sentiment d'anxiété quant au fait que vos comportements personnels ne contribueront guère à résoudre le problème ?* ») En France, Hélène Jalin a développé une autre échelle : « *Les questions portent sur les manifestations anxio-dépressives mais aussi sur les difficultés relationnelles. C'est important car les éco-anxieux ont tendance à s'isoler parce qu'ils sont en colère contre ceux qui minimisent les impacts du changement climatique.* »

Ces ébauches de classification ont notamment pour but de savoir quand la « ligne jaune » est franchie. « *L'éco-anxiété devient pathologique quand les émotions paralysent au lieu de mobiliser* », déclare Antoine Pelissolo. Chaque décision du quotidien est analysée en fonction de son poids écologique. Quel vêtement acheter ? Où partir en vacances ? Et tout est source de stress. Ne pas nier cet état de souffrance est la priorité. « *Faire verbaliser les émotions et légitimer ce qu'ils ressentent est essentiel* », assure Antoine Pelissolo. Un travail qui, dans la grande majorité des cas, ne vise pas à réduire ni à relativiser ses émotions, qui ont pour fonction de nous alerter et qui nous poussent à agir.

A. PELISSOLO

« L'éco-anxiété devient pathologique quand les émotions paralysent au lieu de mobiliser »

Antoine Pelissolo, chef du service de psychiatrie sectorisée au CHU Henri-Mondor, à Créteil

Pour les spécialistes, la prise en charge des écoanxieux ne doit pas être médicamenteuse. Aussi, pour échafauder une démarche thérapeutique, les soignants cherchent des sources d'inspiration. Les phases du deuil, marquées par un ensemble d'émotions ayant une fonction adaptative, ressemblent à celles que traversent les éco-anxieux qui devront accepter la réalité pour apprendre à vivre avec et malgré la perte… non pas d'une personne mais d'une nature, d'un environnement, de certaines espèces, etc. L'inscription à une association est une piste. « *Certains psychiatres et psychologues sont prêts à la prescrire parce que l'on sait que c'est la société qui est malade et pas l'individu* », indique la pédopsychiatre Laelia Benoit, qui compare cette démarche à celle utilisée pour traiter les dépressions induites par le racisme. « *Le plus efficace, ce sont les groupes de parole, les actions militantes.* » Les éco-anxieux qui agissent contre le réchauffement climatique, surtout collectivement, restent éco-anxieux, mais sont alignés avec leurs valeurs. Pour Tobias Brosch, il faut jouer sur « *le warm glow effect* », cette sensation de bien-être liée à des actions altruistes : « *Ces récompenses additionnelles sont prometteuses en matière d'éco-anxiété.* »

Prévalence, facteurs de risque, prise en charge, tout est en chantier. De même que la formation des soignants à cette nouvelle forme de mal-être. Le Réseau des professionnels de l'accompagnement face à l'urgence écologique (RAFUE) a vu le jour il y a un an. Ces pionniers veulent éviter toute banalisation. La multiplication d'actions radicales de la part de jeunes militants, mais aussi de chercheurs en climatologie, leur fait dire qu'il y a urgence. ■

ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES

L'importance du traumatisme climatique

Le « Camp Fire », ce gigantesque incendie qui a ravagé 621 km² de terres californiennes pendant 13 jours en 2018, a laissé des séquelles. Un an après, les victimes avaient « *des déficits dans le traitement des interférences, c'est-à-dire que les personnes exposées au feu étaient plus distraites et ne pouvaient pas se concentrer facilement sur une tâche* », témoignait la psychiatre Jyoti Mishra, auteure d'une étude parue en janvier dans *Plos Climate*. Ces constatations d'ordre cognitif, ainsi qu'une forte prévalence de la dépression et de l'anxiété, suggèrent que le traumatisme climatique est un trouble à part entière, distinct du stress post-traumatique. Camille Gaubert

NOAH BERGER/AP/SIPA

Les personnes exposées au gigantesque incendie de 2018 en Californie (États-Unis) présentaient, plus d'un an après, des troubles cognitifs dont un déficit de l'attention.

CÉLINE ESCOLANO/SAIF IMAGES

Deuxième cause de mortalité des nourrissons dans le monde, la bronchiolite a connu un pic épidémique exceptionnel cet hiver en France.

La révolution médicale de la bronchiolite

L'épidémie de bronchiolite est particulièrement sévère cet hiver. Mais les parents des nourrissons pourront compter à l'avenir sur un nouveau médicament pour empêcher les formes graves de cette affection respiratoire et sur un vaccin à ARN messager aux résultats prometteurs.

Virulente, sévère et précoce. Cet hiver, l'épidémie de bronchiolite s'est révélée *« très atypique par son ampleur et ses débuts. C'est la plus importante de ces douze dernières années »*, souligne le professeur Albert Faye, chef du service pédiatrique à l'hôpital Robert-Debré (Paris). Les premières admissions aux urgences ont débuté dès la fin du mois de septembre dernier, un mois plus tôt que les années précédentes. Autre particularité : l'âge des patients. Si la bronchiolite touche essentiellement les enfants, les hôpitaux ont accueilli beaucoup plus de nourrissons de moins de 3 mois cet hiver, *« et malheureusement, c'est chez eux que la bronchiolite peut être grave »*, déplore Brigitte Virey, présidente du Syndicat national des pédiatres français (SNPF).

Cette affection respiratoire, qui atteint surtout les bébés mais aussi les personnes âgées, est la deuxième cause de mortalité des nourrissons dans le monde. Le virus respiratoire syncytial (VRS) est à l'origine de la plupart des cas. Et à l'instar de la majorité des infections virales,

les médecins ne disposent que de peu de traitements pour prendre en charge les malades (*lire l'encadré ci-dessous*). *« L'une des explications possibles quant à la recrudescence de maladies virales cet hiver est le concept de "dette immunitaire"*, propose Brigitte Virey. *Il se pourrait que la population ait aujourd'hui moins de défenses immunitaires car elle a rencontré moins de virus ces deux dernières années, notamment avec l'application des gestes barrières. Cependant, ce n'est sûrement pas le seul facteur et cette notion reste très controversée.* » La dernière semaine de novembre, Santé publique France recensait un pic épidémique exceptionnel avec plus de 8000 passages aux urgences pour bronchiolite chez les enfants de moins de 2 ans.

Mais de récentes annonces pourraient changer la donne dès l'hiver prochain. En novembre 2022, les laboratoires AstraZeneca et Sanofi ont en effet annoncé la validation par la Commission européenne d'une nouvelle molécule, le nirsevimab, qui empêcherait les formes graves de bronchiolite. *« Il ne s'agit ni d'un vaccin, ni d'un traitement. Cette molécule a une vocation préventive »*, précise Albert Faye. Cela consiste en une injection d'anticorps monoclonaux, c'est-à-dire de molécules immunitaires « clonées » en grand nombre à partir d'anticorps produits par des personnes ayant été infectées par le VRS.

NORA TRAIMOND, CHU BORDEAUX

Radiographie pulmonaire d'un enfant sujet à des bronchiolites à répétition.

Des anticorps modifiés pour augmenter leur durée d'action

Comment ces anticorps protègent-ils d'une infection grave ? Pour comprendre, il faut entrer dans le détail des réactions moléculaires. Afin d'infecter une cellule, le virus doit fusionner sa membrane avec celle de la cellule humaine. Parmi les mécanismes en jeu pour permettre cette fusion, une protéine joue un rôle indispensable : la protéine F. *« Elle se présente sous deux conformations et c'est le changement d'un état à l'autre qui permet l'assemblage des membranes »*, explique Timothée Bruel, chercheur dans l'unité Virus et immunité à l'Institut Pasteur, à Paris. L'anticorps monoclonal se fixe justement sur la protéine F lorsqu'elle est dans la première conformation. Il l'empêche ainsi de réaliser le processus de fusion et le VRS n'est plus capable d'infecter les cellules humaines *(voir l'infographie ci-contre)*. Les premiers résultats de l'essai de phase 3, baptisé Melody, mettent en évidence une efficacité de plus de 70 % du nirsevimab pour la bronchiolite. *« C'est une proportion considérable et cela représente beaucoup d'espoir pour les hôpitaux, dont les services étaient saturés cette année »*, insiste Albert Faye.

Mieux : la protection promet non seulement d'être importante, mais aussi durable. *« Une autre particularité du nirsevimab est que les anticorps ont été modifiés de façon à augmenter considérablement leur demi-vie »*, ajoute Timothée Bruel. La demi-vie est le temps nécessaire à l'organisme pour éliminer 50 % d'un composé. Concrètement, cela signifie que ces nouveaux anticorps vont rester plus longtemps dans le sang par rapport à des anticorps naturels. *« Cette modification prolonge la demi-*

SYMPTÔMES

Faciliter la respiration des nourrissons

Jusqu'à présent, les médecins ne disposaient que de peu d'outils pour prendre en charge la bronchiolite, l'enjeu restant de diminuer les symptômes, qui peuvent être très impressionnants pour les jeunes parents et engendrer des complications. Au début, la bronchiolite se traduit par une faible fièvre, et éventuellement un peu de toux. En revanche, cette infection évolue très vite, surtout chez les tout-petits. *« On perçoit une forte gêne respiratoire. La toux s'accentue et le nourrisson peut alors cesser de s'alimenter »*, met en garde Brigitte Virey. L'objectif est donc de faciliter la respiration des nourrissons, pour lui permettre de s'alimenter correctement et d'éviter la déshydratation. Sa saturation en oxygène — soit le taux d'oxygène contenu dans les globules rouges une fois les poumons traversés — est contrôlée afin d'assurer une aide respiratoire si nécessaire. Depuis 2019, la kinésithérapie respiratoire, une technique très utilisée dans la prise en charge de la bronchiolite, n'est plus recommandée par la Haute Autorité de santé pour dégager les bronches des nourrissons de moins de 1 an. En cause, une incertitude quant à son efficacité, avec un manque de données scientifiques dans ce domaine.

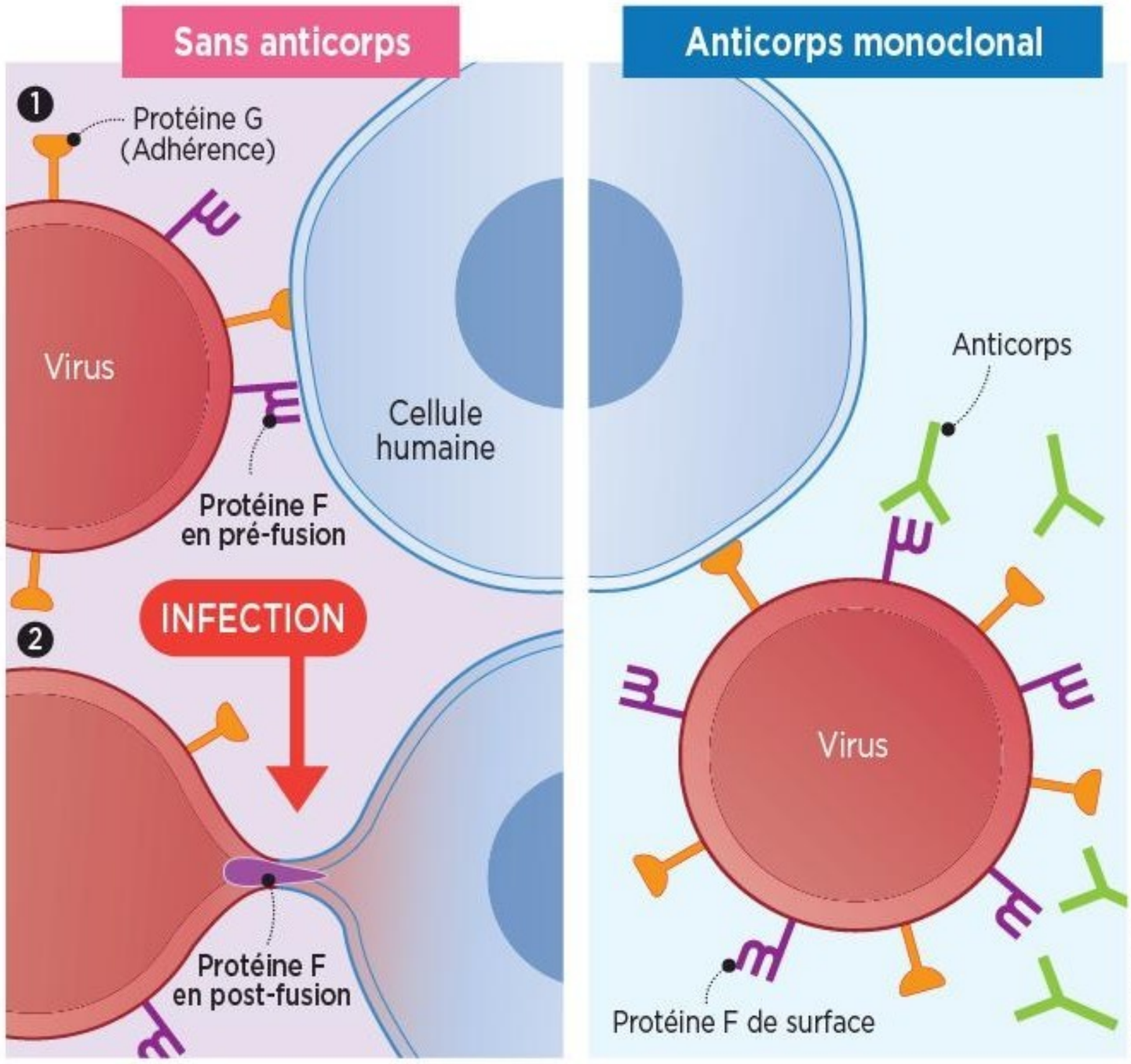
vie jusqu'à six mois. Aussi, une seule injection pourrait offrir une protection pour tout l'hiver », avance le chercheur. Un avantage considérable sur un autre anticorps monoclonal, le palivizumab, déjà utilisé en France. Celui-ci cible également le VRS, mais sans cette modification, il doit être injecté chaque mois. Cette contrainte et son prix — près de 670 euros par flacon — ont conduit à réserver son usage pour les nourrissons nés prématurément et les enfants à risque.

Un nouveau vaccin à ARNm efficace à 84 %

Aussi prometteur soit-il, ce nouveau traitement ne signifie pas la fin de la bronchiolite. « *Il y aura encore des cas, bien sûr : d'une part, parce qu'il peut y avoir des échecs et, d'autre part, parce qu'il existe d'autres virus qui peuvent donner des bronchiolites, comme le métapneumovirus, le virus para-influenza, l'adénovirus… Mais ce serait sans commune mesure avec ce qu'on connaît actuellement* », estime Albert Faye. Surtout que le nirsevimab pourrait ne pas être le seul traitement à même de changer la donne face à cette maladie.

Fin janvier, la biotech Moderna a en effet annoncé les résultats prometteurs de son nouveau vaccin à ARN messager pour la bronchiolite, dont l'efficacité avoisinerait les 84 %. Les premières injections pourraient être administrées fin 2023 ou début 2024. L'essai de phase 3 a fait appel à 37 000 personnes de plus de 60 ans, mais d'autres études sont en cours afin de déterminer l'efficacité du vaccin sur les nourrissons et les femmes enceintes. Comme pour son vaccin contre le Covid-19, le laboratoire a recours à l'ARN messager (ARNm) pour prévenir la bronchiolite. L'ARNm renferme une partie du plan de construction du virus. Il est injecté dans l'organisme, protégé par une enveloppe de graisse, appelée « nanoparticule lipidique ». À l'intérieur des cellules humaines, il déclenche la production d'une protéine caractéristique du virus, qui migre vers la surface des cellules. Cette protéine est alors reconnue par des cellules immunitaires, les lymphocytes B, qui vont activer la production d'anticorps spécifiques à cette protéine. Ainsi, le vaccin induit une réponse du système immunitaire du corps en lui présentant une partie du virus.

Deux espoirs portés par deux approches différentes. « *Dans le cas du vaccin, on apprend au corps à se défendre en produisant lui-même les anticorps dont il a besoin. C'est ce qu'on appelle la prophylaxie active. L'injection d'anticorps monoclonaux, quant à elle, apporte à l'organisme simplement de quoi se protéger : c'est la prophylaxie passive* », résume Timothée Bruel. D'autres vaccins classiques pourraient être commercialisés d'ici à l'année prochaine, comme ceux du laboratoire américain Pfizer, testé sur les femmes enceintes, et du britannique GSK pour les seniors. Avec ce nouvel arsenal, la prise en charge de la bronchiolite pourrait connaître rapidement un tournant majeur. ■ **Marie Parra**



L'anticorps monoclonal se fixe sur la protéine F, empêchant ainsi le virus de fusionner avec les cellules humaines en vue de les infecter.

ALBERT FAYE

« Une seule injection de nirsevimab pourrait offrir une protection pour tout l'hiver »

Albert Faye, chef du service pédiatrique à l'hôpital Robert-Debré, à Paris

Le microbiote, un allié contre le cancer du côlon

Des chercheurs canadiens ont identifié des bactéries intestinales jouant un rôle dans l'inflammation des tissus. Ils tentent maintenant de modifier la composition du microbiote afin d'éviter des complications après une opération du côlon et de réduire les risques de récidive.

Au Centre hospitalier de l'université de Montréal (CHUM), au Canada, des scientifiques vont bientôt modifier la flore intestinale d'un patient atteint de cancer, ici celui du côlon, dans les jours qui précèdent son intervention chirurgicale. Leur objectif est double : diminuer à court terme les complications postopératoires, et, à plus long terme, limiter les récidives. L'oncomicrobiotique est le champ de recherche original d'un trio de chercheurs qui vient de faire l'objet, en décembre 2022, d'une publication dans la revue *Gut*. Une première. Les deux chirurgiens, le Pr Carole Richard et le Dr Roy Hajjar, en collaboration avec une immunologiste, la professeure Manuela Santos, sont bien déterminés à trouver la composition idéale d'une telle supplémentation. Avec l'espoir de la proposer aux patients à haut risque de complications avant une chirurgie pour cancer colique.

On sait aujourd'hui que certains déséquilibres du microbiote intestinal — qui contient plus de 100 milliards de microorganismes non pathogènes —, en lien avec de nombreux autres facteurs (génétiques, alimentaires, environnementaux…), jouent un rôle déterminant dans le développement des cancers colorectaux. On sait également que la chirurgie du cancer du côlon impose parfois une dérivation chirurgicale amenant à relier temporairement le côlon à une poche placée au niveau de la peau (stomie ou anus artificiel), avant la remise en continuité de l'intestin, réalisée au moment d'une intervention ultérieure. Or, *« dans les suites de ce type d'intervention, des fuites intestinales surviennent dans environ 30 % des cas [au niveau de la suture chirurgicale] »*, précise Carole Richard, responsable du service de chirurgie digestive au CHUM.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

« Nous travaillons à la mise au point d'un marqueur fécal pour repérer les patients à risque de complications postopératoires »

Roy Hajjar, résident chercheur dans le service de chirurgie digestive au Centre hospitalier de l'université de Montréal (Canada)

Le profil bactérien est lié au risque de complications

« Une revue attentive de la littérature nous a donné l'idée de faire un lien avec le microbiote et de créer une biobanque de selles », raconte Roy Hajjar, résident chercheur dans le service. Les deux chirurgiens ont alors collaboré avec Manuela Santos, responsable du laboratoire de micronutrition et du microbiome au centre de recherche du centre hospitalier. Ensuite, ont pu démarrer les analyses des selles des patients opérés

IMAGE SOURCE/BSIP

Le côlon vu en coloscopie virtuelle. Une bactérie intestinale, « Parabacteroides goldsteinii », pourrait faciliter la cicatrisation après une opération.

pour des cancers digestifs acceptant de participer au programme de recherche. *« Les premiers résultats issus des analyses de la biobanque nous ont beaucoup étonnés »*, poursuit Roy Hajjar. Les trois scientifiques se sont en effet rendu compte que les compositions du microbiote intestinal des patients différaient selon la présence ou non de fuites intestinales. Ils ont alors réalisé une expérience sur des souris, transplantant des microbiotes des patients au niveau du système digestif de rongeurs sains. Selon le profil bactérien transplanté, les animaux se retrouvaient avec un risque plus ou moins haut de complications.

« Cela revient à démontrer que le microbiote intervient directement, de manière causale, dans la survenue des complications », résume Carole Richard. *« Les mécanismes en jeu ici sont en lien avec la production, par certaines espèces bactériennes, de composés intervenant à différents niveaux dans la cascade de l'inflammation,* explique Manuela Santos. *Pour mieux les comprendre, il ne faut pas simplement obtenir l'identification des bactéries dans les selles, mais aussi en effectuer le séquençage précis grâce aux outils sophistiqués dont nous disposons dans notre plateforme de recherche.* » Pour l'instant, deux souches bactériennes, *Alistipes onderdonkii* et *Parabacteroides goldsteinii,* ont attiré l'attention des chercheurs. La première a plutôt montré un effet pro-inflammatoire en augmentant le risque de fuite, la seconde est au contraire anti-inflammatoire et réduit la sécrétion locale de cytokines, ce qui tend à améliorer la cicatrisation.

30 %
La probabilité de fuites intestinales, au niveau de la suture chirurgicale, après une opération du côlon.

Trouver la composition idéale de bactéries à administrer

Reste désormais à trouver la composition idéale d'un mélange de bactéries — ou de substrats pour favoriser les bactéries bénéfiques (prébiotiques) — qui, administré par exemple quelques jours avant la chirurgie chez les patients à risque de présenter des fuites, et prolongé ensuite pendant deux semaines, permettrait d'éviter les complications futures. *« Nous espérons démarrer un essai clinique de tolérance sur une vingtaine de patients recevant soit un prébiotique, soit un placebo,* poursuit Roy Hajjar. *Nous travaillons aussi à la mise au point d'un marqueur fécal pour repérer plus facilement les patients à risque de complications postopératoires.* » Des pistes se profilent déjà avec la lipocaline 2, une protéine surexprimée dans les selles des patients qui présentent ces complications, plus sensible que la calprotectine, le marqueur utilisé aujourd'hui pour quantifier le degré d'inflammation de la muqueuse digestive.

Autant de recherches dont les enjeux sont importants, car réduire les fuites se traduirait pour les patients non seulement par une amélioration de leur qualité de vie, mais aussi par une réduction de leur séjour à l'hôpital et une reprise plus rapide de leurs activités. Des arguments économiques auxquels plusieurs instituts de recherche en santé canadiens n'ont pas été insensibles, puisque ce projet, lauréat fin 2022 du prix du meilleur article scientifique du Forum canadien de chirurgie, a bénéficié d'un financement combiné d'un million de dollars canadiens (700 000 euros). Au-delà de ces travaux, l'oncomicrobiotique ouvre un nouveau champ de recherche et se déclinera à terme sur d'autres types d'interventions digestives. ■

Sylvie Riou-Milliot,
envoyée spéciale à Montréal

Faut-il encore manger de la charcuterie ?

Rillettes, saucissons, jambons crus et autres cochonailles doivent être consommés avec une extrême modération car ces préparations cumulent les contre-indications nutritionnelles.

Saucissons, jambons, boudins, terrines… Préparée à partir de viande et d'abats de porc, de gibier (sanglier, lièvre) ou de volaille (canard, oie), la charcuterie peut être cuite (jambons, pâtés, rillettes, boudins, andouilles) ou crue (jambon cru, saucissons), conservée avec du sel ou bien fumée. Incontestables amateurs, les Français en ont acheté 27,9 kilogrammes par foyer en 2019 (1). Mais pas question d'en abuser, en raison de certains de ses effets nocifs avérés sur la santé. En manger moins et surtout mieux, telle pourrait être la nouvelle devise des amateurs de cochonnailles.

Elle apporte des protéines et certains minéraux…

Il faut compter 24,5 g de protéines pour 100 g d'andouillette poêlée et 7,2 g pour trois tranches de saucisson sec (30 g). Le boudin noir est le plus riche en fer avec 17,4 mg/100 g, soit l'équivalent des besoins quotidiens d'une femme non ménopausée. On retrouve aussi des teneurs intéressantes en vitamine B1 ou thiamine (1,2 mg/100 g de jambon sec découenné, soit l'ensemble des besoins nutritionnels conseillés pour une femme), laquelle aide à préserver les fonctions cognitives (concentration, mémoire, raisonnement, etc.). Les charcuteries peuvent également être une source de zinc (2,5 mg/100 g de pancetta) et de sélénium (17 µg/100 g de mousse de foie de porc) (2).

150 g

La quantité de charcuterie à ne pas dépasser par semaine, soit l'équivalent d'environ trois tranches de jambon blanc.

SOURCE: ANSES.

… mais parfois trop de graisses saturées…

Les rillettes et les saucissons sont les plus gras, avec 39,8 g de lipides pour 100 g de rillettes d'oie et 34,5 g/100 g de saucisson sec. Andouilles, saucisson sec, terrine de campagne, bou-

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

ACIDES GRAS SATURÉS Acides gras saturés en hydrogène. Ils se trouvent principalement dans les graisses animales, ainsi que dans les huiles de palme et de coco.

ADDITIFS NITRÉS Conservateurs chimiques utilisés pour donner une couleur rose à la viande, allonger la durée de conservation et bloquer le développement de germes pathogènes (*Clostridium botulinum*, salmonelles, *Listeria*).

NITRATES Substances naturelles entrant dans le cycle de l'azote, présentes dans l'eau et certains végétaux, en particulier dans les légumes feuilles tels que les épinards ou la laitue.

dins, rillettes pur porc apportent 11 à 21 % d'acides gras insaturés, dont l'acide oléique (oméga-9) et l'acide linoléique (oméga-6), ainsi que 8 à 15 % d'acides gras saturés. Une portion de 50 g de pâté de lapin en fournit 4,4 g (7,6 g pour 50 g de rillettes pur porc). Selon l' Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses), les graisses saturées sont sans risque quand elles ne représentent pas plus de 12 % des calories journalières, soit environ 26 g pour 2000 kcal (3). Mais en excès, elles favorisent le dépôt de plaques riches en cholestérol sur la paroi interne des artères.

... et de sel

Constituant essentiel des produits de salaison (jambons secs, saucissons), le sel n'en est pas moins un condiment à limiter à moins de 5 g par jour, selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), car il augmente la pression artérielle et accroît les risques de développer une maladie cardio-vasculaire. Or, une seule tranche de jambon serrano (25 g) en apporte environ 1,3 g. Les industriels affichent parfois la mention « -25 % de sel », laquelle prend généralement pour référence la teneur moyenne en sel des produits de la même gamme (les jambons cuits supérieurs, les jambons de Paris, etc.), toutes marques confondues.

Les additifs nitrés posent problème

Les nitrites de potassium et de sodium (E249, E250) et les nitrates de sodium et de potassium (E251, E252), utilisés comme conservateurs, forment dans le tractus gastro-intestinal des composés nitrosés (nitrosylhème, S-nitrosothiols et nitrosamines), connus pour leur caractère génotoxique et cancérogène. En 2010, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a ainsi classé les nitrates et les nitrites ingérés comme « *probablement cancérogènes* » (4), et en 2015, la charcuterie et les salaisons comme « *cancérogènes certains* » pour l'humain. En 2022, l'Anses a confirmé l'existence d'une association entre le risque de cancer colorectal et l'exposition aux nitrites ou aux nitrates par la viande transformée (5). En outre, consommer de la charcuterie au moins une fois par semaine augmenterait de 29 % le risque de développer une bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), selon une étude franco-américaine (6).

Prudence avec les alternatives « sans nitrites ajoutés »

Certains industriels proposent des jambons, saucisses et saucissons « sans nitrites ajoutés », ou « zéro nitrite ». Ils substituent les additifs nitrés par des extraits ou des bouillons de légumes antioxydants à base de céleri, de betterave ou de carotte, ce qui réduirait de 18 à 29 % l'exposition totale aux nitrites des adultes. Mais dans son rapport, l'Anses note que ce procédé ne constitue pas une réelle alternative, dans la mesure où ces végétaux sont également une source naturelle de nitrates, dont une partie est convertie en nitrites sous l'action des bactéries présentes dans la cavité buccale. Pour réduire l'exposition aux nitrites tout en garantissant la sécurité sanitaire des charcuteries, l'Anses propose d'autres solutions comme le raccourcissement des dates limites de consommation. ■

Sylvie Boistard @syboistard

MAËLA LE BORGNE Diététicienne-nutritionniste à Paris

Choisir des produits artisanaux de qualité

« Pour limiter les nitrites, on peut se tourner vers les produits artisanaux qui contiennent moins de conservateurs, mais il faut accepter que la durée de conservation soit plus courte. Les procédés de fabrication du jambon de Parme, et plus généralement des charcuteries AOP, interdisent l'usage d'additifs tandis que les mentions Label rouge garantissent en général des produits de meilleure qualité que les produits industriels. Dans tous les cas, bien lire les étiquettes permet d'éviter les mauvaises surprises, comme par exemple, des rillettes d'oie fabriquées avec de la graisse de porc. »

(1) Kantar Worldpanel/Fict, 2020.

(2) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(3) Les lipides, Anses.

(4) Ingested nitrate and nitrite, and cyanobacterial peptide toxins, Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, IARC 2010.

(5) Évaluation des risques liés à la consommation de nitrates et nitrites, Avis révisé de l'Anses, Rapport d'expertise collective, Anses, juillet 2022.

(6) Processed Meat Intake and Risk of Chronic Obstructive Pulmonary Disease among Middle-aged Women, Varraso R. et al, *eClinical Medicine*, 2019.

Cinq questions pour faire face à la fatigue

Petit coup de mou à la sortie de l'hiver, ou gros épuisement qui ne passe pas malgré un sommeil suffisant… Il existe différentes formes de fatigue et différentes façons d'y répondre efficacement.

Par Émilie Gillet, avec Agence Forum News

1 Vitamines, médicaments antifatigue, un recours utile ?

On trouve en vente libre, en pharmacie ou dans les rayons bien-être des magasins bio, par exemple, de nombreux traitements contre la fatigue (on parle d'antiasthéniques) : il peut s'agir de cocktails d'acides aminés, minéraux, oligo-éléments et vitamines, d'extraits de plantes comme le guarana ou le ginseng dont certaines médecines traditionnelles vantent les vertus antifatigue. Cependant, aucune de ces substances n'a réellement démontré son efficacité lors d'études scientifiques sérieuses, alors qu'elles coûtent un certain prix et que la plupart peuvent être apportées naturellement par une alimentation équilibrée et diversifiée.

Les autorités sanitaires recommandent donc de n'utiliser ces produits que sur de courtes périodes, une à deux semaines maximum en cas de fatigue passagère, et jamais comme un traitement de fond. Il existe aussi des psychostimulants tels que la caféine, le déanol et la sulbutiamine qui, eux, présentent plus de risques d'effets secondaires (insomnie, palpitations cardiaques, maux de tête, troubles digestifs…) que de réels bénéfices et qui sont donc déconseillés.

2 L'activité physique peut-elle être un remède ?

Cela paraît contre-intuitif, mais la pratique régulière d'une activité physique modérée, comme 30 minutes de marche ou de vélo chaque jour, permet de réduire globalement la sensation de fatigue : cela a été démontré par de nombreuses études scientifiques. Notamment parce que l'activité physique est un puissant régulateur du rythme circadien, et qu'elle améliore la qualité du sommeil. Ainsi, une revue de la littérature scientifique publiée en 2005 dans *Clinics in Sports Medicine* révèle que la pratique d'une activité physique moins de 4 heures avant le coucher augmente le temps total de sommeil et diminue la durée des éveils nocturnes. On retrouve même ces effets bénéfiques chez les personnes atteintes d'un cancer ou d'une maladie chronique, à condition bien sûr que l'activité soit adaptée à leurs possibilités.

3 Les femmes sont-elles plus exposées au risque de fatigue ?

Oui, et ce pour plusieurs raisons. D'après des données de l'Insee publiées en 2015, les femmes consacrent 3 h 26 par jour aux tâches domestiques (ménage, courses, soins aux enfants, préparation des repas) contre 2 heures pour les hommes, en plus de leur journée de travail. À quoi s'ajoute la charge mentale, cette donnée

SHUTTERSTOCK

Plus de 40 % des Français se sentent plus fatigués après un effort physique depuis la pandémie de Covid-19.
Un tiers déclarent être moins motivés dans ce qu'ils font au quotidien. **78 % l'expliquent par la charge mentale** et le stress au quotidien.
47 % par les mauvaises habitudes de vie. SOURCE : SONDAGE IFOP SEPTEMBRE 2022 ET SONDAGE ODEXA MAI 2022.

Pour être heureux, mangez mieux

Les études sont formelles : ce que nous mangeons influence directement notre humeur. Non seulement un bon repas est source de plaisir, mais une alimentation saine et équilibrée favorise aussi une humeur positive.

Des nutriments qui font du bien

Les centaines de milliards de neurones qui constituent le cerveau s'échangent en permanence des molécules appelées neurotransmetteurs, tels que la sérotonine, la dopamine et le GABA notamment qui influencent l'humeur. Sans eux, le moral est plus facilement en berne ! Le cerveau consomme chaque jour 20% des réserves de glucose, mais il a également besoin de nutriments spécifiques pour faire fonctionner son réseau de neurones et fabriquer les neurotransmetteurs.

Faire le plein d'Omega 3

Ces acides gras sont des constituants essentiels de la membrane qui enveloppe les cellules, et notamment les neurones. Des études ont montré le lien direct entre une carence en Omega 3 et la survenue d'une sensation de mal-être.

B comme Bien-être

Les Vitamines B, et en particulier les Vitamines B3, B6 et B9, sont essentielles au maintien de fonctions psychologiques normales. La Vitamine B5 participe en outre à la synthèse des neurotransmetteurs.

Magnésium : gare à la carence

Une carence en Magnésium peut favoriser les troubles de l'humeur. En situation d'anxiété, il est expulsé en grandes quantités des cellules. En situation d'angoisse intense et/ou chronique, le corps épuise donc rapidement ses réserves. Il s'ensuit non seulement de la fatigue, mais aussi une plus grande sensibilité à l'anxiété.

Des plantes dans votre assiette

Les pistils de la fleur de Safran contribuent à préserver l'équilibre émotionnel en favorisant une humeur positive et une sensation de relaxation, propices au bien-être.

La racine de Rhodiola est adaptogène : elle aide l'organisme à résister normalement aux situations d'anxiété. Son efficacité sur le burn-out a d'ailleurs été démontrée de très nombreuses fois dans des études cliniques.

Un geste simple pour retrouver le sourire

Zenytud est un concentré d'actifs naturels d'exception (Rhodiola, Safran et Lactium®) associés pour la première fois en une même formule pour agir sur les neurotransmetteurs les plus importants dans les troubles anxieux (GABA, sérotonine, dopamine).

Leur action synergique fait de **Zenytud** une formule à la fois puissante et naturelle, idéale en situation de mal-être psychologique.

Zenytud contient également du bisglycinate de Magnésium, la forme la mieux assimilée par l'organisme, ainsi que des Vitamines B qui contribuent à des fonctions psychologiques normales et à réduire la fatigue.

Zenytud peut être pris en continu tout au long de l'année et ne provoque ni effet indésirable ni accoutumance. La formule de **Zenytud** étant fortement concentrée, il est recommandé de demander l'avis d'un médecin avant son utilisation.

Des conseils ?

Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au 01 84 20 63 56 et sur www.zenytud.com

Zenytud est disponible en pharmacie grâce au code ACL.

Zenytud 60 gélules végétales code ACL **602 42 55**.

"Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour" www.mangerbouger.fr

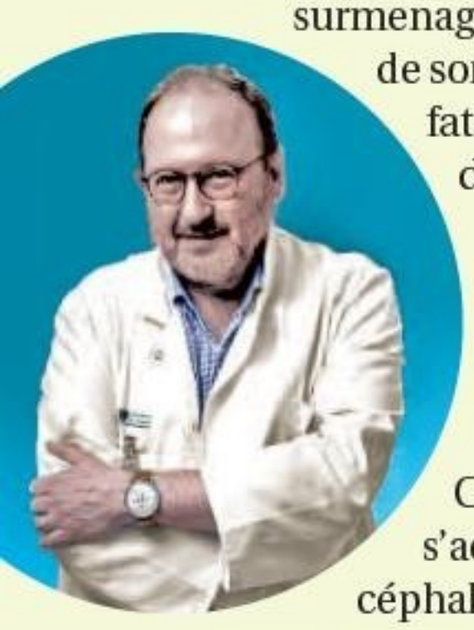
AVIS D'EXPERT

PR FRANÇOIS-JÉRÔME AUTHIER* NEUROLOGUE (AP-HP, PARIS)

« Le diagnostic d'un syndrome de fatigue chronique prend du temps »

Comment se manifeste le syndrome de fatigue chronique ?

C'est une fatigue physique inexpliquée, sans lien avec un surmenage ou des problèmes de sommeil, liée à une fatigue psychique et des difficultés cognitives qui durent depuis plus de six mois, souvent associées à des douleurs musculo-articulaires. Chez certains, cela s'accompagne de céphalées inhabituelles, de ganglions perceptibles, ou d'une intolérance à l'effort physique. Ce syndrome est aussi appelé encéphalomyélite myalgique.



Quels examens sont pratiqués pour le diagnostiquer ?

Il n'y a pas d'examen type, le diagnostic est avant tout clinique par l'interrogatoire du patient. Mais la prescription d'examens par imagerie médicale et de bilans sanguins permet d'exclure toute autre cause de fatigue importante comme des troubles endocriniens, une sclérose en plaques ou un cancer. Cela prend du temps et les spécialistes de la maladie sont peu nombreux malheureusement.

Comment les patients sont-ils pris en charge ?

Certains médicaments peuvent être utiles, comme les antidouleurs ou les antidépresseurs. Dans les centres hospitaliers spécialisés, on peut traiter les patients par la L-carnitine qui augmente l'apport énergétique aux cellules. Mais l'essentiel repose sur les thérapies cognitives et comportementales, et plus particulièrement le *pacing* (stimulation progressive), dont l'objectif est d'apprendre aux patients à gérer leur fatigue au quotidien. Dans l'idéal, il faudrait des structures d'évaluation et de prise en charge de la fatigue sur tout le territoire, comme il en existe pour la douleur. ■

Propos recueillis par É .G.

* Membre du Réseau européen sur l'encéphalomyélite myalgique et le syndrome de fatigue chronique

non quantifiable qui consiste à organiser et planifier toutes ces tâches familiales, et qui peut générer stress et fatigue psychique — même si un certain rééquilibrage est sans doute à l'œuvre chez les jeunes couples. Enfin, il y a aussi des raisons physiologiques. Les règles hémorragiques sont le premier motif de consultation gynécologique chez les femmes de plus de 40 ans. Or, des pertes régulières et abondantes de sang peuvent être à l'origine d'une anémie ou d'une carence en fer, et donc d'une fatigue chronique. D'autre part, les femmes sont deux fois plus touchées que les hommes par l'hypothyroïdie, un trouble endocrinien qui se manifeste notamment par un épuisement important. Et puis, ne l'oublions pas, elles sont également davantage sujettes aux insomnies : 16,9 % en souffrent, contre 9,1 % pour les hommes.

4 Pourquoi est-on fatigué pendant et après une infection ?

On parle d'asthénie infectieuse, très fréquente lors d'une grippe, d'une mononucléose infectieuse ou d'un Covid. Une infection met en jeu la production d'interférons par le système immunitaire afin de bloquer la multiplication du pathogène. Or ces interférons sont aussi de puissants inducteurs de fatigue, on le voit par exemple chez les malades souffrant d'hépatite C et traités par injections d'interférons. Cette fatigue perdure même longtemps après la fin du traitement.

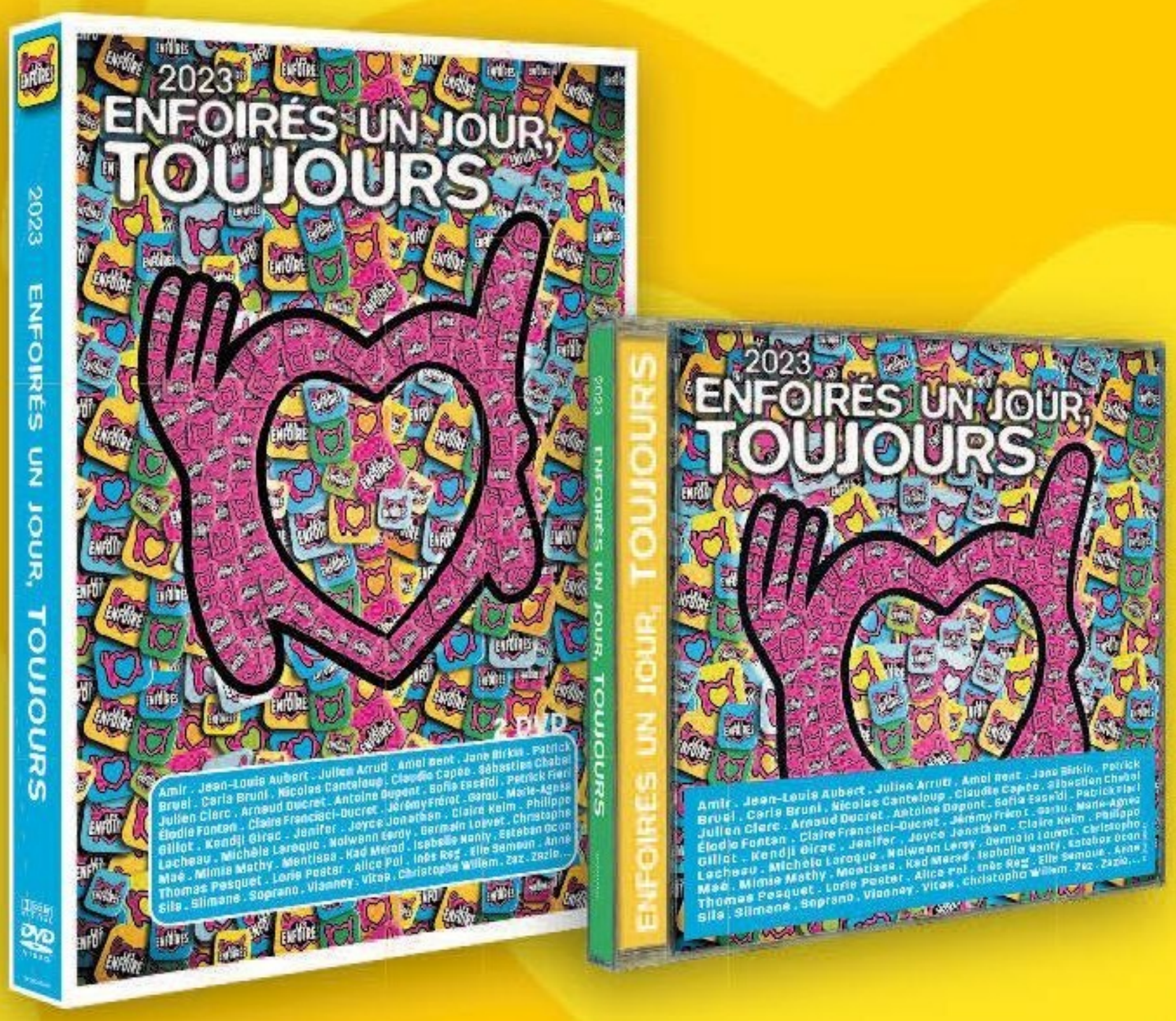
Par ailleurs, certains pathogènes induisent la production de toxines qui provoquent une forme de fatigue musculaire (les fameuses courbatures associées à la grippe, par exemple). Des phénomènes inflammatoires peuvent aussi être impliqués. Enfin, on suspecte,chez certaines personnes ayant des prédispositions génétiques, qu'une infection puisse dérégler de façon durable le fonctionnement du système immunitaire et soit associée à une fatigue qui ne disparaît pas, même avec un sommeil de qualité. Pour l'instant, les mécanismes de ce dérèglement immunitaire ne sont pas bien identifiés.

5 Sans cause manifeste, faut-il s'inquiéter ?

En cas de fatigue passagère, les premiers remèdes consistent à (re)trouver un sommeil de quantité et de qualité suffisantes, à privilégier une alimentation équilibrée et diversifiée, et à pratiquer une activité physique régulière. Si malgré cela et en l'absence de raisons manifestes, la fatigue perdure pendant plusieurs mois, il faut en parler à son médecin traitant. Car de nombreuses maladies plus ou moins sévères peuvent avoir pour conséquence une fatigue chronique. Il peut s'agir simplement d'une déficience ou carence en certains nutriments, de l'effet secondaire d'un traitement comme les antihypertenseurs ou les antiarythmiques, mais aussi de pathologies beaucoup plus graves comme une maladie neurodégénérative (sclérose en plaques, maladie de Parkinson…), une maladie cardio-vasculaire (insuffisance cardiaque, syndrome coronarien…), un trouble endocrinien (diabète, hypothyroïdie…) ou encore un cancer. Une fatigue durable et inexpliquée ne doit jamais être prise à la légère. ■

RETROUVEZ L'INTÉGRALITÉ DU SPECTACLE

2023 ENFOIRÉS UN JOUR, TOUJOURS



LES ENFOIRÉS

DISPONIBLE EN DOUBLE DVD & DOUBLE CD

Amir . Jean-Louis Aubert . Julien Arruti . Amel Bent . Jane Birkin . Patrick Bruel Carla Bruni . Nicolas Canteloup . Claudio Capéo . Sébastien Chabal . Julien Clerc Arnaud Ducret . Antoine Dupont . Sofia Essaïdi . Patrick Fiori . Élodie Fontan Claire Francisci-Ducret . Jérémy Frérot . Garou . Marie-Agnès Gillot . Kendji Girac . Jenifer . Joyce Jonathan . Claire Keim . Philippe Lacheau . Michèle Laroque . Nolwenn Leroy . Germain Louvet . Christophe Maé . Mimie Mathy Mentissa . Kad Merad . Isabelle Nanty . Esteban Ocon . Thomas Pesquet Lorie Pester . Alice Pol . Inès Reg . Elie Semoun . Anne Sila . Slimane Soprano . Vianney . Vitaa . Christophe Willem . Zaz . Zazie...

PLUS QUE JAMAIS, LES RESTOS ONT BESOIN DE VOUS
CHAQUE CD OU DVD VENDU = 17 REPAS OFFERTS AUX RESTOS DU CŒUR

L'INTÉGRALITÉ DES BÉNÉFICES DE LA VENTE DES DOUBLES CD ET DVD SERA REVERSÉE AUX RESTAURANTS DU CŒUR POUR LEUR ACTION 2023/2024

© Xavier Grosbois

SONY MUSIC COLUMBIA

LES RESTAURANTS DU CŒUR

Le fameux squelette, qui trône depuis 1898 dans la galerie de Paléontologie et d'Anatomie comparée du Muséum à Paris, a été démonté en vue de sa restauration. Catherine Crocq, chargée du chantier, nettoie ici une omoplate.

Mammouth de Durfort

La redécouverte d'un géant

À l'occasion de la restauration du spécimen vedette du Muséum national d'histoire naturelle, une équipe scientifique multidisciplinaire s'est mobilisée pour relancer des recherches autour de ce squelette exhumé il y a 150 ans, rare représentant d'une espèce méconnue : le mammouth méridional. Reportage.

Par Cécile Dumas - Photos : Clarisse Rebotier pour « Sciences et Avenir-La Recherche »

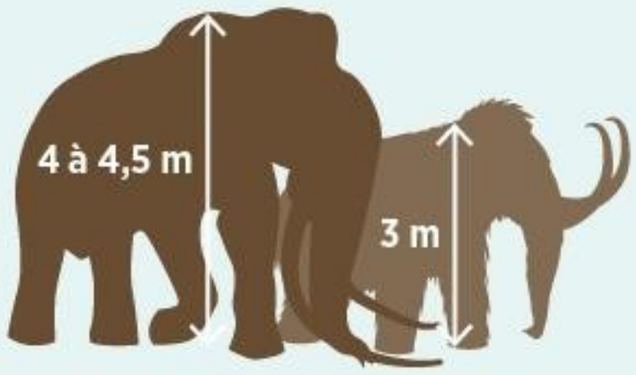
« *J'ai des vertèbres ! Directement en connexion ou du moins très proches l'une de l'autre. Possible qu'il y ait de la bestiole en quantité par ici !* » Émergeant du trou que vient de creuser la pelle mécanique dans le terrain argileux de Durfort-et-Saint-Martin-de-Sossenac, dans le Gard, le paléogénéticien Régis Debruyne, du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), à Paris, a le sourire en brandissant sa trouvaille. Ses deux collègues lèvent la tête des gravats excavés qu'ils étaient en train de scruter avec attention. Un peu plus tôt, Vincent Pernègre, chargé de collection au MNHN, y a repéré une incisive d'hippopotame. Dario de Franceschi, paléobotaniste au MNHN, une pomme de pin fossilisée. Alors qu'ils avaient prévu de creuser jusqu'à quatre mètres, les chercheurs ont aussitôt stoppé la machine pour inspecter les couches d'argiles dégagées à seulement deux mètres de profondeur. Frédéric Grande est descendu de la cabine de la pelleteuse pour s'accroupir au bord de la fosse et voir les vertèbres fossiles. Ce natif de la commune gardoise se réjouit de l'ouverture de cette fouille : « *Je ne sais pas pourquoi je ne creuse pas plus de trous à Durfort, moi ! — Mais si tu creuses ailleurs ça ne marchera pas,* lui répond Régis Debruyne, *il faut que tu creuses ici !* » « *Ici* », c'est à quelques dizaines de mètres du lieu où Paul ▸

PHILIPPE CONDOMINES

PHYLOGÉNÉTIQUE

Un mammouth à poil ras moins connu que son cousin laineux

Si le squelette du mammouth de Durfort est une « star » de la galerie de Paléontologie du Muséum national d'histoire naturelle, son espèce est très peu connue. Le mammouth méridional, *Mammuthus meridionalis*, est pourtant parmi les plus massifs de ces éléphantidés disparus, cousins des actuels éléphants. Cette espèce est issue de la colonisation de l'Eurasie, il y a plus de 3 millions d'années, par les premiers mammouths venus d'Afrique. Elle est ainsi présente dans toute l'Europe au début du quaternaire, il y a 2,5 millions d'années, des Carpates à la côte Atlantique, de l'Angleterre à la péninsule Ibérique. Le climat y est alors chaud, voire tropical, et ce mammouth au poil ras vit dans un environnement forestier. Le refroidissement du climat va progressivement favoriser la steppe au détriment des forêts. Une lignée s'adapte, se nourrissant d'herbes plutôt que de feuilles d'arbres : c'est le mammouth des steppes (*M. trogontherii*). Le mammouth méridional va, lui, se retrancher vers le sud de l'Europe, jusqu'à disparaître il y a 700 000 ans. Au même moment, une autre branche évolue plus à l'est, en Sibérie, adaptée au climat glaciaire : le fameux mammouth laineux (*M. Primigenius*). Leur morphologie est très similaire : une trompe, deux défenses, qui sont le développement d'une paire d'incisives de la mâchoire supérieure, et des molaires à lamelles. Le mammouth laineux n'égalera jamais en taille son lointain cousin, mais c'est lui que les humains préhistoriques ont côtoyé et immortalisé par leurs dessins sur les parois des grottes.



INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS

Cazalis de Fondouce et Jules Ollier de Marichard ont découvert en 1869 le squelette fossile d'un mammouth. Aujourd'hui, il reste une petite cuvette au milieu des arbres, à l'endroit où les ossements ont été sortis. « *La position du squelette — pattes arrière vers le bas, mais tête, trompe et pattes de devant projetées vers le haut — ressemble à une tentative pour s'extraire d'un trou marécageux dans lequel il serait tombé, il y a environ un million d'années* », expose Régis Debruyne. Impossible cependant pour son équipe de rouvrir l'ancien site de fouilles : les propriétaires du terrain s'y opposent. L'équipe s'est donc installée de l'autre côté de la départementale, nommée route du Mammouth. Un panneau y rappelle la découverte qui a marqué à tout jamais le village du Gard. Depuis 1876 et la fin des fouilles par les deux découvreurs, aucun paléontologue n'avait rouvert un chantier à Durfort. Il a fallu que le MNHN lance le projet de restauration de ce spécimen, à l'automne 2020, pour que des chercheurs décident d'y retourner. Régis Debruyne et ses collègues n'espèrent pas mettre au jour un autre fossile de mammouth méridional. S'ils creusent, c'est d'abord pour retrouver le bon « filon » fossilifère et en savoir plus sur le squelette qui est exposé au Muséum depuis 125 ans.

D'autres fossiles retrouvés sur place vont aider à l'analyse

Avec ses 7 mètres de long, ses 4,5 mètres de hauteur au sommet du crâne et ses deux immenses défenses, le squelette du mammouth de Durfort domine ses voisins au cœur de la galerie de Paléontologie et d'Anatomie comparée du MNHN. Il est l'un des rares spécimens complets connus de l'espèce *Mammuthus meridionalis (lire l'encadré ci-dessus)*, avec celui du musée des Abruzzes en Italie. Exposé au public depuis l'ouverture de la galerie en 1898, ce squelette exceptionnel n'a depuis fait l'objet d'aucune rénovation. « *Il a souffert des changements de température et d'humidité qui l'ont fragilisé, il s'est encrassé, et son état nécessitait une intervention urgente* », résume Cécile Colin-Fromont, responsable de la galerie de Paléontologie. Bien avant que le squelette soit démonté, une foule de questions a émergé, relate Régis Debruyne. À commencer par l'âge précis de l'animal. « *On sait que les mammouths méridionaux ont existé dans cette partie de la France entre -2,5 millions d'années et -800 000 ans. Dans les années 1870, aucune information stratigraphique précise n'a été relevée ; nous ne sommes pas certains de la couche sédimentaire dans laquelle il se trouvait. Il nous manque une datation précise.* » C'est ainsi que ce spécialiste des éléphantidés s'est retrouvé à gratter des argiles au scalpel, en quête de grosses dents, de l'eau boueuse jusqu'aux genoux après de

À Durfort, le chantier rouvert par les chercheurs du Muséum : Vincent Pernègre surveille le travail de la pelleteuse qui agrandit le trou dans les couches d'argile ; plus tard, il dégage avec précaution vertèbres et mâchoire découvertes dans la fosse (en haut à droite). Régis Debruyne (ci-contre) montre la dent d'hippopotame mise au jour sur le site.

bonnes averses cévenoles. L'objectif est de découvrir une dent de mammifère de belle taille pour fournir la quantité d'émail nécessaire à Jean-Jacques Bahain, spécialiste de radiodatation au MNHN. Après une première tentative infructueuse, un second séjour à Durfort a permis aux chercheurs de trouver une dent d'hippopotame et une mâchoire de cervidé. Une fois réalisée l'indispensable mesure de radioactivité *in situ* dans les argiles, Jean-Jacques Bahain a plusieurs mois de travail en laboratoire pour analyser le rapport uranium/thorium de l'émail : connaissant la vitesse à laquelle l'uranium se désintègre en thorium, le rapport entre les deux radioéléments donne une mesure du temps écoulé.

« Aujourd'hui, notamment d'après la comparaison avec la forme de dents de mammouths méridionaux trouvées ailleurs et datées précisément, on estime que celui de Durfort a vécu entre -800 000 et -1,2 million d'années », détaille Régis Debruyne. Une fenêtre temporelle encore large qu'il espère resserrer avec une marge d'erreur de moins de 30 000 ans grâce à la datation uranium/thorium. En parallèle, la sédimentologue Cécile Chapon-Sao a prélevé une centaine de petits cubes sur toute la hauteur de la coupe, tous les 5 centimètres, afin d'analyser en laboratoire leur composition et surtout déterminer leur magnétisme. *« On peut mesurer l'orientation du champ magnétique qui a été enregistrée pendant la sédimentation »*, explique la chercheuse. Sachant que le champ magnétique s'est inversé à plusieurs reprises au cours de l'histoire de la Terre — la dernière fois il y a 780 000 ans — cela permet de situer les sédiments dans le temps.

« Toutes ces approches sont complémentaires », précise le paléobotaniste Dario De Franceshi. De retour au laboratoire avec ses échantillons de bois et de pommes de pin, il a identifié les espèces présentes. Un pin, semblable au pin d'Alep, et du chêne méditerranéen. Cette flore indique *« un climat méditerranéen humide et chaud, dans un*

« Aujourd'hui, on estime que le mammouth de Durfort a vécu entre -800 000 ans et -1,2 million d'années »

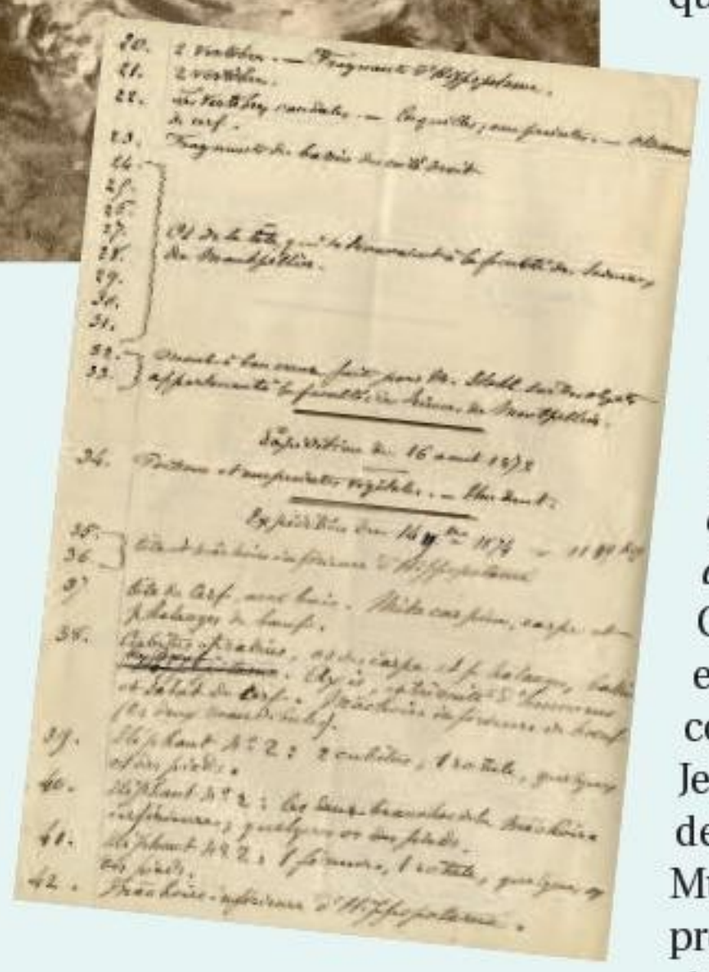
Régis Debruyne, paléogénéticien au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), à Paris

RETOUR SUR

Des fouilles riches en péripéties

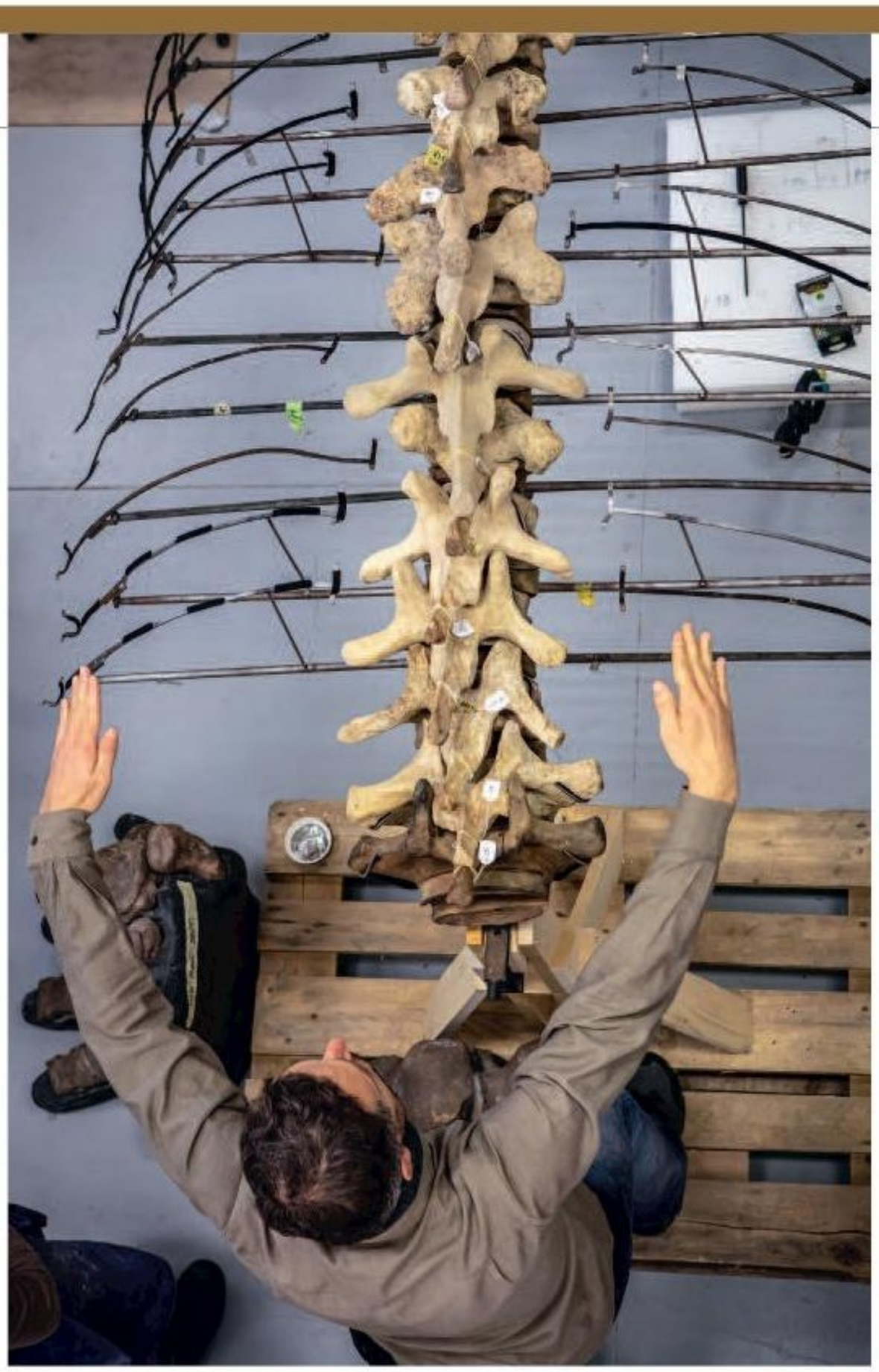
Tout commence par le coup d'œil aiguisé d'un passionné de géologie et de préhistoire qui, depuis la hauteur d'une diligence qui l'amène à Durfort en novembre 1869, repère une bizarrerie au bord de la route. « [...] *J'aperçus sur un de ces tas* [de pierres] *un fragment qui me parut sensiblement différent de ses voisins,* relate Paul Cazalis de Fondouce. *Il semblait formé de trois plaquettes soudées les unes aux autres, ce qui lui donnait une certaine ressemblance avec un fragment de molaire d'éléphant.* » C'est ainsi que cet ingénieur, accompagné de son ami archéologue Jules Ollier de Marichard, découvre « *une dent d'éléphant* » et d'autres fossiles dans ces gravats sortis un an plus tôt lors de travaux d'élargissement de la route. Dans les jours qui suivent, une première fouille permet de sortir le crâne complet et les défenses d'un spécimen appelé à l'époque éléphant. Ils sont envoyés à la faculté des sciences de Montpellier. Pour les deux hommes c'est le début d'une aventure de plusieurs années dont les détails n'ont émergé qu'à l'occasion de la restauration du squelette, grâce à la découverte de nouvelles archives. Les héritiers de Paul Cazalis de Fondouce ont retrouvé un dossier contenant de nombreux courriers ainsi que son précieux récit des événements. « *Mieux connaître cette histoire nous a permis de comprendre l'état du fossile et les défis posés par sa restauration* », explique Cécile Colin-Fromont, responsable de la galerie de Paléontologie et d'Anatomie comparée du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN).

ARCHIVES PRIVÉES DE PAUL CAZALIS DE FONDOUCE @ MNHN - JC.DOMENECH



Le fossile en 1873, photographié avant qu'il ne soit exhumé ; ci-contre, une page des carnets dans lesquels Paul Cazalis de Fondouce a répertorié tout le matériel fossile sorti du site de Durfort et transmis au Muséum entre 1873 et 1876.

« *Je pus acquérir la conviction qu'y avait là le squelette complet de l'animal* », écrit le découvreur. Il aperçoit les premières vertèbres, une partie de l'omoplate et quelques côtes. Cependant, « *éclairé sur la valeur des objets contenus dans son champ* », le propriétaire du terrain décide de sortir le squelette pour son propre compte. En juillet 1870, il écrit à l'ingénieur « *qu'il avait commencé à mettre à découvert les ossements du squelette d'éléphant, qu'il en était à moitié corps et que la chose lui paraissait très intéressante* ». Les négociations financières entre les découvreurs et le propriétaire traînent en longueur, la guerre éclate avec la Prusse. Ce n'est qu'en mai 1873, une fois l'affaire conclue avec le Muséum et son appui financier, que les fouilles reprennent à Durfort. Trois années pendant lesquelles le fossile est exposé à la pluie, au froid, à la chaleur. « *Les ossements étaient dans un tel état de friabilité* », relate Paul Cazalis de Fondouce, qu'il est nécessaire de les consolider sur place. Jean-Sébastien Stahl, chef de l'atelier de moulage du Muséum, célèbre pour son procédé de consolidation à chaud à base de blanc de baleine, se rend à Durfort. Une fois extrait et mis en caisses, le squelette est expédié en train à Paris. La faculté de Montpellier cède le crâne contre dédommagement. Ainsi, en juillet 1873, l'éléphant de Durfort arrive au Muséum où un bâtiment spécial sera construit pour son montage. Il est l'une des pièces maîtresses de la galerie de Paléontologie lors de son inauguration en 1898. Jusqu'à aujourd'hui. ■



Dans l'atelier de restauration installé au Muséum, Régis Debruyne travaille avec les restaurateurs pour corriger la courbure du dos du squelette (en bas et à gauche) ; les anciens moulages des pieds (à droite) seront remplacés par les vrais ossements et leurs « semelles » (en noir) par un nouveau socle.

milieu forestier, où il y a quand même de l'eau et de la lumière, liée à la présence d'une petite falaise », analyse-t-il. Et ces essences correspondent aux empreintes fossiles de végétation trouvées dans les années 1870 à Durfort. Un constat qui conforte celui de Vincent Pernègre, fin connaisseur des collections du MNHN : la couleur jaune ocre des os fossiles d'hippopotame et de cervidé qu'ils ont déterrés à Durfort est la même que celle des ossements du mammouth extraits au XIXe siècle. Ils creusent bien dans le même niveau fossilifère.

Cette couleur jaune, ocre clair, les visiteurs de la galerie de Paléontologie à Paris pourront la découvrir grâce au travail de restauration du squelette, qui va lui redonner sa teinte d'origine. Une fois le mammouth démonté, ce sont près de 200 pièces qui ont été transportées dans un vaste atelier du Muséum, réaménagé pour l'occasion. De grandes caisses contiennent tibias, humérus, ou encore fémur — qui mesure à lui seul un mètre et demi. Sur une table, des vertèbres alignées dessinent la queue de l'éléphantidé. Pour l'équipe des restaurateurs de la société Aïnu, la tâche est vaste et délicate. « *La majorité des pièces est très composite,* explique Catherine Crocq, en charge du chantier. *Au XIXe siècle, les parties manquantes ont été comblées avec du plâtre, du mastic cireux. Les os ont été consolidés avec des colles à base de protéines animales, et quand ils ne pouvaient pas coller, les restaurateurs utilisaient des goujons de bois — sorte de grosses chevilles — et posaient des toiles de renfort sur certaines fissures. L'ensemble est très fragile.* » Grattant le plâtre au scalpel sur une omoplate, elle s'applique à retrouver l'os fossile et à le dégager. Chaque pièce demande un à trois jours de travail en moyenne, et ce sont au total plusieurs mois de chantier pour un budget de 375 000 euros.

Rectifier certaines anomalies d'assemblage du squelette

L'équipe d'Aïnu a aussi collaboré avec les scientifiques du Muséum pour concevoir le remontage du mammouth. C'était l'occasion de rectifier certaines anomalies. « *Le squelette a été monté avec un dos très à plat alors que la silhouette des mammouths se caractérise par une ligne en pente régulière depuis le haut du front jusqu'à la queue, puisque les membres avant sont plus grands que les membres postérieurs* », indique Régis Debruyne. Avec la restauration, le squelette a récupéré sa courbe naturelle et son cou la bonne longueur, après avoir été débarrassé de disques qui avaient été ajoutés entre les vertèbres cervicales

pour stabiliser l'ensemble. La position des pattes est également modifiée, avec une légère pliure de la patte avant droite, pour correspondre à la démarche du mammouth qui, comme les éléphants ou les chameaux, se déplaçait en levant simultanément les deux pattes d'un même côté. Enfin, le fossile retrouve ses pieds et mains d'origine: dans les années 1970, à la suite de vols, ces os avaient été remplacés par des moulages, posés sur de grosses semelles que tout le monde s'accorde à trouver *« très laides »*. Un nouveau socle métallique a été créé sur mesure pour exposer les vrais os, au nombre de 21 pour chaque pied.

Une pièce importante gardera cependant sa part de bizarrerie : la tête. *« Je me suis toujours dit qu'il avait davantage un crâne d'éléphant d'Asie que de mammouth »*, commente Régis Debruyne. *« Le premier a un front large et plat, avec deux bosses latérales, alors que le second a un front concave, avec un creux au-dessus de la fosse nasale »*. Sa forme a-t-elle été recomposée à partir d'un crâne incomplet en s'inspirant du crâne des éléphants, parmi lesquels on classait ce mammifère à l'époque? Le démontage a offert une opportunité unique: passer sa tête aux rayons X. Le crâne est ainsi parti au laboratoire de mesures nucléaires du CEA à Cadarache (Bouches-du-Rhône), le seul à posséder un appareil capable d'accueillir ce crâne de plus d'un mètre de large et pesant 380 kg. Grâce à la tomographie aux rayons X à hautes énergies, plus habituée à analyser des colis de déchets nucléaires, une vue 3D du crâne a été obtenue, indiquant la répartition des matériaux à 0,5 millimètre près. Et là… l'intuition du spécialiste s'est confirmée : *« L'os fossile représente à peine 5 % du total, on a surtout du plâtre, du bois, du métal »*, détaille Régis Debruyne. Sur les images se distinguent nettement une armature métallique, des planchettes de bois clouées et un important volume de plâtre. *« C'est un peu décevant mais ce n'est pas vraiment une surprise. »*

Sur le crâne du mammouth, on distingue les deux molaires à lamelles (au centre), parties originelles qui ont pu être conservées.

Pas de nouvelle reconstitution pour la tête sans modèle d'origine

Alors faut-il modifier la forme du crâne, ou le refaire ? *« Il est difficile de refaire un crâne alors que nous n'avons pas le modèle d'origine,* explique Régis Debruyne. *Les dessins de Jules Ollier de Marichard qui ont été retrouvés sont insuffisants pour avoir un modèle en trois dimensions. On pourrait s'appuyer sur le squelette du mammouth méridional des Abruzzes, mais cela resterait hypothétique. »* *« Nous ne pourrions pas inclure les parties d'os restantes et les mâchoires dans une nouvelle reconstitution, ni les défenses, ce serait dommage, »* ajoute Cécile Colin-Fromont. Le choix a donc été fait de restaurer le crâne tel qu'il est, répondant aux exigences de conservation du patrimoine auxquelles cette restauration est soumise *(lire l'encadré ci-contre)*.

La quête scientifique est loin d'être achevée. À Durfort, on espère la reprise des fouilles, les argiles n'ayant pas tout livré. En attendant, le mammouth s'apprête à remonter sur son podium parisien. Initialement prévue pour février, l'inauguration du squelette a été repoussée de plusieurs semaines, en raison d'un problème avec l'alliage métallique des mâts porteurs d'origine. ■

DÉCRYPTAGE

CÉCILE COLIN-FROMONT

RESPONSABLE DE LA GALERIE DE PALÉONTOLOGIE ET D'ANATOMIE COMPARÉE AU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, À PARIS

Un nécessaire arbitrage entre science et patrimoine

“La galerie de Paléontologie du Muséum et tout ce qu'elle contient est classée au titre des monuments historiques. L'architecte en cheffe nous a indiqué dès le départ qu'elle désirait conserver le mammouth dans son intégralité avec son soclage. Or, les scientifiques souhaitaient lui donner une position anatomique plus correcte, ce qui impliquait de modifier la structure métallique qui va du cou jusqu'à l'extrémité de la queue. On a mis tout le monde autour de la table et chacun a fait des concessions. Les scientifiques ont obtenu de changer la posture des pattes, l'architecte de conserver le soclage de la cage thoracique, des côtes, de la colonne. Au départ, il nous semblait que cette contrainte patrimoniale allait compliquer la tâche des restaurateurs, mais finalement cela l'a simplifiée, parce qu'on partait d'un travail très bien fait à l'origine et de plus innovant. À l'époque, pour monter un squelette, on perçait les os pour mettre des tiges métalliques à l'intérieur. Le mammouth de Durfort est l'un des premiers spécimens qui a été monté avec des cerclages pour ne pas endommager les os fossiles et préserver au maximum la matière fossile. ”

ANDREAS CHRISTOFFER NILSSON, SECRETSOFTHEICE.COM - VEGARD VIKE, MUSEUM OF CULTURAL HISTORY

La latte de bois de 187 cm, découverte en septembre 2021 dans les glaces du Digervarden (Norvège), possède un type de fixation identique à celle mise au jour dans la même zone en 2014 (en médaillon).

Aux racines norvégiennes du ski moderne

La récente découverte d'une paire de skis vieille de 1300 ans et remarquablement conservée dans la glace recentre l'histoire de ce sport sur la Norvège, qui a développé et modernisé son usage.

Norvège, septembre 2021: l'archéologue Runar Hole et son compagnon d'expédition Bjørn Hessen arpentent les flancs du mont Digervarden, à quelque 300 km au nord d'Oslo, à la recherche d'un ski vieux de 1300 ans. Leur enquête dure depuis 2014, après que des scientifiques du Programme d'archéologie des glaciers de l'Oppland ont découvert sur cette même montagne de 1780 mètres une latte de bois ancienne remarquablement préservée et équipée d'une rare bride de fixation. Sa jumelle est *« encore mieux conservée »* selon les mots de Runar Hole. Soit une latte de bois de 187 cm de long et 17 cm de large équipée également d'un système de fixation du talon. Les chercheurs ont ainsi réuni la paire de skis ancienne la mieux conservée au monde! L'analyse par le carbone 14 a montré qu'elle date de 750 ans après J.-C. À cette époque, le royaume de Norvège n'existait pas et la Scandinavie pré-Viking était peuplée par ▸

PRATIQUE

En France, une discipline d'abord militaire

Présenté pour la première fois en France il y a exactement 150 ans, lors de l'exposition internationale de 1878 sur le Champ-de-Mars à Paris, le ski est adopté en 1900 par l'armée en vue de contrôler la frontière alpine franco-italienne. Le ministère de la Guerre établira quatre ans plus tard une école de ski à Briançon (Hautes-Alpes). Les années 1920 et 1930 connaîtront l'essor du ski de loisir et sportif, qui sera couronné en 1936 par l'organisation des premiers jeux Olympiques d'hiver à Chamonix (Haute-Savoie).

les Samis, les Lapons et les Germains. Cette découverte apporte un nouvel éclairage sur l'histoire du ski en Europe, dont la plus ancienne relique, trouvée dans une tourbière de Sibérie, remonte à 6300 avant J.-C., soit bien avant l'invention de la roue, au IVe millénaire avant notre ère ! La peinture rupestre de l'île de Rødøy, en Norvège, nous montre quant à elle un skieur de 4500 à 5000 ans avant J.-C. Enfin, la plus ancienne paire de skis connue à ce jour — mais incomplète — et découverte en Suède date de 3200 ans avant J.-C. « *L'apparition des skis est probablement liée au retrait des glaciers après la dernière période glaciaire, il y a environ 10000 ans. Élans et caribous ont alors migré de l'Asie centrale vers le nord de l'Europe, entraînant dans leurs pas les peuples de chasseurs* », explique Lars Pilø, archéologue au conseil du comté d'Oppland, dans un article paru en 2018 dans *The Journal of Glacial Archaeology*. C'est dans ce contexte qu'est apparu l'usage de planches de bois permettant de progresser plus aisément en se maintenant au-dessus du manteau neigeux. Le mot « ski » lui-même est traditionnellement lié à un mot du vieux norrois désignant des billettes de bois, mais des similitudes sont également identifiées avec des vocables mongols.

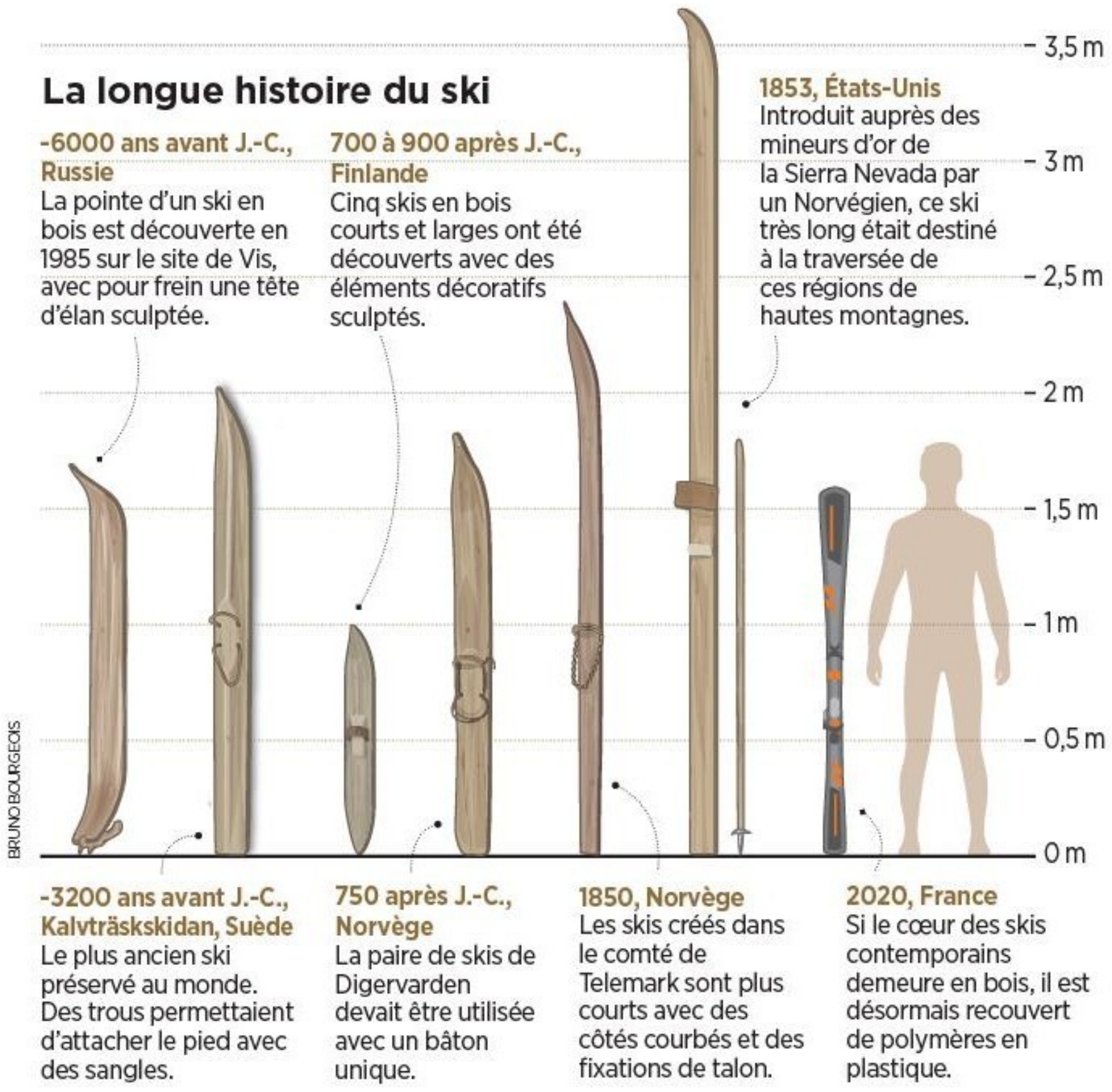
Au Moyen Âge et jusqu'au début du XXe siècle, cette pratique est demeurée un mode de transport et de chasse répandu dans les pays nordiques. Mais c'est plus spécialement en Norvège que s'est écrite l'histoire qui conduit au ski moderne. Des poèmes épiques mettent ainsi en scène les dieux vikings Ullur et Skadi, qui ont entre autres le ski pour attribut. Le petit royaume organise dès le XIe siècle une course à skis, nommée « la Saga du roi Harald », et au XVIIIe siècle fait de ses soldats des skieurs en hiver. C'est précisément pour stimuler leur entraînement que le commandement militaire décide, en 1767, de distinguer les meilleurs skieurs en pente raide et sur terrain plat, le tir le plus précis en pente et la plus rapide évolution entre les arbres — soit les ancêtres des compétitions de descente, de fond, de biathlon et de slalom. Avec des techniques bien différentes d'aujourd'hui, les skieurs d'alors utilisant une semelle de fourrure sous le ski pour progresser dans la couche neigeuse et un unique bâton de bois pour établir leur équilibre.

Le télémark, virage de l'évolution

La technique du ski a connu une évolution majeure lors d'une course nationale à Christiana (l'actuelle Oslo), dans les années 1860. Trois fermiers du comté de Telemark l'emportèrent haut la main, parcourant 200 km en trois jours. Le menuisier Sondre Norheim était l'artisan de cette victoire. Dans une région montagneuse, l'homme affrontait quotidiennement la pente abrupte qui reliait sa maison au village. Pour se faciliter la vie, il a travaillé la forme de ses skis et les a équipés de fixations rigides de maintien des pieds. Cela lui a ensuite permis d'aborder les virages en infléchissant le genou intérieur, technique qui se répandra ensuite dans les pays nordiques et qui porte toujours le nom de télémark. Mais ce n'est qu'à la fin du XIXe siècle que le ski norvégien acquiert une dimension internationale, grâce à Fridtjof Nansen. L'explorateur polaire devient célèbre pour avoir traversé pour la première fois en 1888 la calotte du Groenland. Une épopée héroïque effectuée à ski, avec ses cinq compagnons. Il atteint de la même manière la position la plus boréale du monde, en 1895. Plus jeune, Fridtjof Nansen avait été distingué plusieurs fois du titre de champion de Norvège du ski de fond. Il a ensuite rédigé des articles de presse mettant en scène cette pra-

NORDLAND COUNTY

Cette gravure rupestre, datée de 4500 à 5000 ans avant J.-C., montre un skieur sur de grandes planches (à gauche). Mise au jour en 1933 sur l'île Rødøy (Norvège), elle a été vandalisée en 2016 par deux enfants souhaitant la rendre plus lisible (à droite).



BRUNO BOURGEOIS

tique dans les paysages majestueux de son pays. « *Les articles de Nansen furent les premières odes à la poudreuse, au silence des champs de neige, à l'ivresse des descentes. Il fut le premier à l'écrire avec assez de talent littéraire pour le rendre évocateur, et susciter le désir* », écrit Alexis Jenni dans son livre *Le Passeport de Monsieur Nansen* *.

Cette histoire plurimillénaire s'enrichit donc aujourd'hui d'enseignements inédits apportés par l'exceptionnelle découverte des archéologues norvégiens. Parfaitement conservée, la paire de ski du VIIIe siècle a permis de réaliser des répliques et de les expérimenter. « *La grande largeur du ski est adaptée à la neige épaisse,* souligne Lars Pilø sur son site scientifique Secrets of the ice. *Dans les montagnes chinoises de l'Altaï, il existe encore une tradition vivante de chasse au cerf dans ce type de neige, ce dont on trouve trace également dans des textes médiévaux norvégiens. C'est une technique très efficace, qui voit le chasseur épuiser le cerf avant de se rapprocher pour le tuer.* » Le pied n'étant pas fermement immobilisé comme pour les skis modernes, il n'est pas possible de changer de cap en appuyant sur le flanc externe du ski. Dans les montagnes chinoises de l'Altaï, où l'on utilise encore des skis semblables à ceux de Digervarden, l'emploi d'un bâton permet de diriger sa trajectoire.

Plus de 2000 artefacts trouvés depuis 2016

Notre skieur norvégien de l'âge de fer prenait grand soin de son équipement : les chercheurs ont identifié des traces de réparation sur le second ski, une pièce de bois ayant été rajoutée à l'emplacement du pied pour pallier son usure. Des trous ménagés à l'avant des lattes de bois pourraient avoir permis de les traîner derrière soi lors des progressions à pied ou de les diriger en descente. L'usage de ces skis et le sort de leur propriétaire demeurent cependant mystérieux. Quatre flèches et six bâtons d'effarouchement des âges de fer et de bronze ont également été découverts dans les glaces de Digervarden, vestiges des chasses au renne estivales, lorsque les troupeaux se regroupaient sur les plaques de glace pour éviter les insectes, mais peut-être aussi l'hiver, à la recherche de nourriture, comme l'envisagent les archéologues norvégiens Lars Pilø et Espen Finstad. D'un autre côté, la présence de plusieurs cairns — amas de pierres — dans les environs pourrait aussi indiquer l'existence d'un ancien sentier de haute montagne balisé. Un traîneau du XVIIIe siècle, sorti des glaces non loin de là en 2016, semble conforter cette hypothèse.

L'enquête se poursuit aujourd'hui sur le mont Digervarden, à la faveur de la fonte des glaciers. Plus de 2000 artefacts ont déjà été récupérés depuis 2006 dans ce comté d'Oppland, ce qui en fait la région la plus riche en découvertes d'archéologie glaciaire dans le monde. Une abondance qui s'explique par la proximité de ces hautes montagnes avec des vallées habitées dès l'époque préhistorique par des peuples skieurs. ■ **Sylvie Rouat**

@srouat1

LARS PILØ

« L'apparition des skis est probablement liée au retrait des glaciers, il y a environ 10 000 ans »

Lars Pilø, archéologue au conseil du comté d'Oppland (Norvège)

* Éditions Paulsen, octobre 2022.

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90

▶ C'est à voir p. 92

▶ Le ciel du mois p. 93

▶ Chroniques p. 94

▶ Questions de lecteurs p. 96

▶ Solutions des jeux p. 97

▶ Jeux p. 98

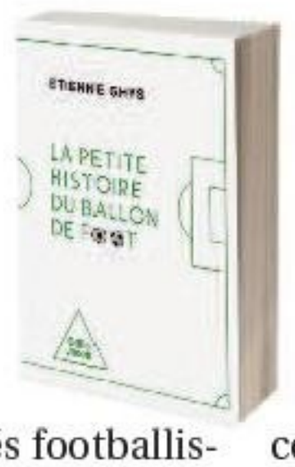
KEITA ILIMA/AP/SIPA

Le ballon utilisé par les joueurs de la coupe du monde de football 2022 (ici un tir de Kylian Mbappé) est un icosidodécaèdre, une figure géométrique complexe.

Joue-la comme Beckham et Archimède

Le mathématicien Étienne Ghys livre un nouveau bijou de vulgarisation, où football et géométrie se mêlent de manière aussi ludique qu'instructive.

GÉOMÉTRIE



Étienne Ghys est ce qu'on pourrait appeler un esthète du ballon rond. Rien à voir avec ses qualités footballistiques ou son amour pour le jeu de possession. De cela nous n'avons aucune idée et, dans ce nouveau livre, il n'en est pas question. Ici, le mathématicien se concentre sur le ballon de football en tant qu'objet géométrique, physique et mathématique. Point de départ : la balle utilisée lors de la coupe du monde de football de 1970, au Mexique. Baptisée Telstar, elle se composait de 12 pièces noires (cinq côtés chacune) et de 20 pièces blanches (chacune six côtés). Un standard, nous explique Étienne Ghys, que les ingénieurs ont pris un malin plaisir à réinventer lors des coupes du monde suivantes, rivalisant de prouesses pour fabriquer un ballon aussi proche que possible de la sphère. Pour la dernière coupe du monde au Qatar, le cuir tâté par les Lionel Messi, Kylian Mbappé et autre Cristiano Ronaldo était ainsi un summum de complexité géométrique : un icosidodécaèdre (20 faces triangulaires et 12 faces pentagonales). Dans un incessant va-et-vient entre le ludique et l'instructif, l'auteur prend ensuite le prétexte du ballon de football pour introduire un certain nombre de problèmes de physique et de théorèmes de géométrie. On jongle alors avec des notions telles que la turbulence, l'effet de spin, le théorème de la rigidité, etc., tout en suivant d'improbables échanges entre Galilée, David Beckham, Archimède et Roberto Carlos. De quoi s'emmêler les pinceaux ? Non, car l'ouvrage est facile à lire et intelligemment illustré, à l'image du précédent, la géniale *Petite Histoire des flocons de neige* (Odile Jacob, 2021). ■

Vincent Glavieux

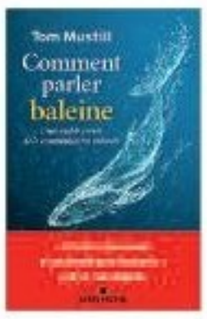
La Petite Histoire du ballon de foot
Étienne Ghys, Odile Jacob, 144 p., 16,90 €

E. T., la quête se poursuit

EXOBIOLOGIE Quelle est l'origine de la vie ? Sommes-nous seuls dans l'Univers ? *« Ces questions sont aussi vieilles que l'humanité mais nous n'avons jamais été aussi proches de pouvoir y apporter une réponse »*, estime Nathalie Cabrol, de l'Institut Seti aux États-Unis. Elle fait le point sur les recherches d'une vie extraterrestre depuis une

quarantaine d'années en abordant tour à tour l'exploration du Système solaire, l'étude des exoplanètes et des signaux extraterrestres ainsi que les types de civilisations ou de vies qu'on espère y trouver. ■ **F. D.**

À L'Aube de nouveaux horizons, Nathalie Cabrol, Seuil, 352 p., 21 €



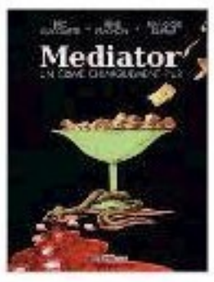
Fascinantes baleines

ÉCOLOGIE Une baleine à bosse renverse son kayak lors d'une sortie d'observation dans la baie de Monterey, en Californie, et sa propre vie en est renversée. Le cétacé a-t-il modifié sa trajectoire pour éviter de l'écraser, comme le suggère une chercheuse à la lecture de la vidéo de l'événement ? Le biologiste et réalisateur Tom Mustill raconte ici d'une plume vivante et précise comment, à partir de cette expérience marquante, il entame un parcours de recherche sur le système de communication des cétacés. Au fil de ses rencontres avec les spécialistes du domaine, l'auteur restitue toute la richesse d'interactions de ces animaux. ■ **A. De B.**

Comment parler baleine, Tom Mustill, Albin Michel, 416 p., 22,90 €

Un polar médical en bande dessinée

BD Après un livre en 2010 (*Mediator 150 mg : combien de morts ?*), des articles de presse, puis le film *La Fille de Brest* en 2016, on pensait tout savoir du scandale de cet antidiabétique des laboratoires Servier, à l'origine de graves atteintes

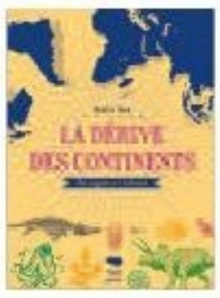


cardiaques. Mais la BD, servie par un dessin vivant et plein de tension, apporte un éclairage neuf et acéré, notamment sur les méthodes de l'empire pharmaceutique de Jacques Servier. Les victimes aussi occupent une place plus importante, tandis que l'enquête du Dr Irène Frachon prend les allures d'un excellent polar. Malheureusement, tout est vrai. ■ **H. J.**

Mediator, un crime chimiquement pur, Irène Frachon, Giacometti, François Duprat, Delcourt, 200 p., 23,95 €

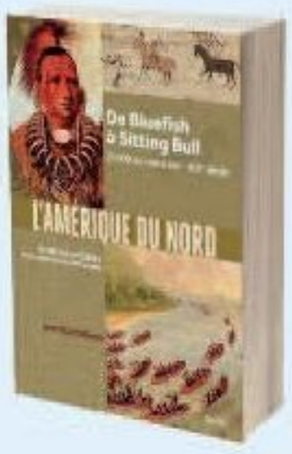
Les âges de la Terre

ÉVOLUTION L'histoire de la dérive des continents est indissociable de l'évolution de la vie, apparitions et disparitions des espèces ayant contribué à forger le destin de notre planète. Les périodes clés de notre passé sont illustrées de manière didactique dans cet ouvrage, qui introduit chaque âge géologique par la mappemonde de l'époque, suivie d'une description de la faune et de la flore présentes alors. Au dévonien, par exemple, les poissons étaient les maîtres du monde, tandis qu'au carbonifère les forêts marécageuses voyaient les premiers reptiles sortir de l'eau. ■ **S. R.**



La Dérive des continents, Martin Ince, Delachaux et Niestlé, 80 p., 24,90 €

L'Amérique du temps long



NATIONS Il faut croire que chaque nouveau titre de la série « Mondes anciens » des éditions Belin, dirigée par l'historien Joël Cornette, est conçu pour forcer l'admiration tant les ouvrages de cette collection parviennent à concilier exhaustivité et esprit de synthèse, érudition et pédagogie, richesse textuelle et respirations visuelles. Le dernier opus consacré aux Amérindiens en est plus que jamais la preuve, compte tenu du temps dans lequel s'inscrit l'histoire de ces peuples : 27 millénaires. Au fil des chapitres organisés chronologiquement, l'archiviste-paléographe Jean-Michel Sallmann narre l'épopée collective de ces centaines de nations indiennes aux territoires, langues, coutumes et croyances variés. Épopée à l'issue tragique pour la plupart d'entre elles, puisque près de quatre siècles de servitude, d'acculturation, d'épidémies et de résistance face aux différents colons européens ont fini par entraîner leur déclin démographique voire, parfois, leur disparition. ■ **Marine Benoit**

L'Amérique du Nord. De Bluefish à Sitting Bull, Jean-Michel Sallmann, Belin, 400 p., 41 €

Les ombres d'un génie

BD Les biographies d'Albert Einstein (1879-1955) sont presque aussi nombreuses que les coups de génie du physicien, mais celle-ci sort du lot. Cette bande dessinée rend compte à la fois du savant aux prises avec la physique en pleine ébullition en ce début du xx^e^ siècle, et de l'homme privé, sûr de lui, obstiné. L'ouvrage d'Ottaviani et Dye nous révèle ainsi toute la complexité de l'homme… et de ses théories. Sur ce point, les auteurs n'ont pas hésité à entrer dans les subtilités et il faut parfois un peu s'accrocher. ■ **F. N.**

Einstein, Jim Ottaviani et Jerel Dye, Vuibert, 304 p. 24,90 €

Une anthropologue en mouvement

BIOGRAPHIE Grande figure intellectuelle du xx^e^ siècle, l'anthropologue Françoise Héritier (1933-2017) lègue une œuvre théorique méconnue. Cette biographie détaille ses travaux sur les systèmes de

parenté étranges, ses apports à l'œuvre de Claude Lévi-Strauss, auquel elle succéda au Collège de France, et explicite *« la valence différentielle des sexes »* qui impose la domination masculine. L'auteur décortique *« une pensée en mouvement »* et l'implication de la chercheuse dans les débats de société : sida, immigration… ■ **R. M.**

Françoise Héritier, Gérald Gaillard, Odile Jacob, 240 p., 22,90 €

EXPOSITIONS

Amiens (80)

Le retour de la momie et des cercueils

Après leur restauration entre 2020 et 2022, deux ensembles funéraires égyptiens, comprenant une momie et trois cercueils, sont à nouveau exposés, dans un espace réservé, enrichi de photographies UV, de vues infrarouges et de radios.

Musée de Picardie, 2, rue Puvis-de-Chavanne. Rens. : 03.22.97.14.00.

Auxerre (89)

En couleurs !

Dans le monde animal ou minéral, chez les insectes ou les coquillages, les couleurs de la nature composent cette exposition originale. Le muséum y fait se croiser sciences physiques, chimie, biologie et histoire.

Muséum, d'Histoire naturelle, 5, boulevard Vauban, jusqu'au 7 juillet. Rens. : 03.86.72.96.40.

Chantilly (60)

Visages des guerres de religion

Ces portraits dessinés, peints, gravés de la Renaissance présentent les protagonistes des affrontements, en France, entre catholiques et protestants. Des libelles et des déclarations imprimées complètent ce panorama.

Château de Chantilly, jusqu'au 21 mai. Rens. : 03.44.27.31.80.

Lille (59)

Bien conservés !

Un musée qui consacre une exposition à… lui-même. Plus exactement, à ses réserves, dont on découvre comment elles sont gérées et entretenues. L'occasion de voir des spécimens et objets jamais présentés jusque-là.

Musée d'Histoire naturelle, 23, rue Gosselet, jusqu'au 3 juillet. Rens. : 03.28.55.30.80.

Lyon (69) / Exposition

Nous, les fleuves

SWIM CITY (2019), FILM DE JÜRG EGLI/ MUSÉE DES CONFLUENCES

Le cours d'eau devient un lieu de loisirs (ici à Genève, dans le film « Swim City »).

Un parcours conçu comme celui d'un fleuve. Dès l'entrée, sa source est figurée par une œuvre représentant les gouttes d'eau originelles. Puis vient la plongée à proprement parler dans le fleuve grâce à une bande sonore et un éclairage aux teintes bleues et vertes. Le visiteur croise ensuite des confluents, tandis que les parois sinueuses de la scénographie rappellent les méandres fluviaux. Le rapport des humains aux fleuves est abordé sous divers angles : les mythologies (indiennes, égyptiennes), l'art — avec des œuvres pointant l'impact des activités humaines sur les fleuves —, la géographie, la géopolitique… L'exposition montre, par exemple, comment le Nil est source de tensions entre l'Éthiopie et l'Égypte. La biodiversité n'est pas oubliée, ni la fragilité des fleuves déstabilisés par les constructions humaines, le réchauffement climatique et la montée des eaux. ■ **Florian Noirit**

Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 27 août. Rens. : 04.28.38.12.12.

Paris (75)

Géographies d'une fusée

Les photographies de Sylvie Bonnot, réalisées au Centre spatial de Kourou, en Guyane, interrogent l'interaction de l'humain avec l'infrastructure des sites de lancement de fusées.

Observatoire de l'espace du Cnes, 2, place Maurice-Quentin, jusqu'au 15 mars. Rens. : 01.44.76.75.00.

Contaminations, après moi le déluge

Le photographe Samuel Bollendorff a réalisé des clichés dans le monde entier sur la pollution des sols, des sous-sols et des eaux par les industries. Résultat : des surfaces impropres à la vie, y compris en Arctique.

Citéco, 1, place du général-Catroux, jusqu'au 23 avril. Rens. : 01.86.47.10.10.

Saint-Étienne (42)

Génial !

Cellulaire, animale, végétale ou… artificielle, l'intelligence est le thème de cette exposition. Au travers de films, jeux et ateliers, le visiteur se familiarise avec une notion sans cesse redéfinie par la recherche scientifique.

La Rotonde, École des mines, 158, cours Fauriel, jusqu'au 13 juillet. Rens. : 04.77.42.02.78.

Vaulx-en-Velin (69)

De la Terre aux étoiles

Cette exposition produite par la Cité de l'espace de Toulouse présente les technologies inventées pour explorer l'Univers : fusées, sondes, robots, satellites… Elle détaille les activités humaines dans l'espace, du point de vue des sciences, de la vie quotidienne ou du tourisme.

Planétarium, place de la Nation, jusqu'au 2 janvier 2024. Rens. : 04.78.79.50.13.

Versailles (78)

Musée Lambinet

Après trois ans de travaux, le musée d'Art et d'Histoire de Versailles a rouvert ses portes en décembre 2022. Toute la scénographie a été revue, avec un deuxième étage consacré à l'histoire de la ville entre les XVIIe et XXe siècles.

Musée Lambinet, 54, boulevard de la Reine. Rens. : 01.30.97.28.75.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

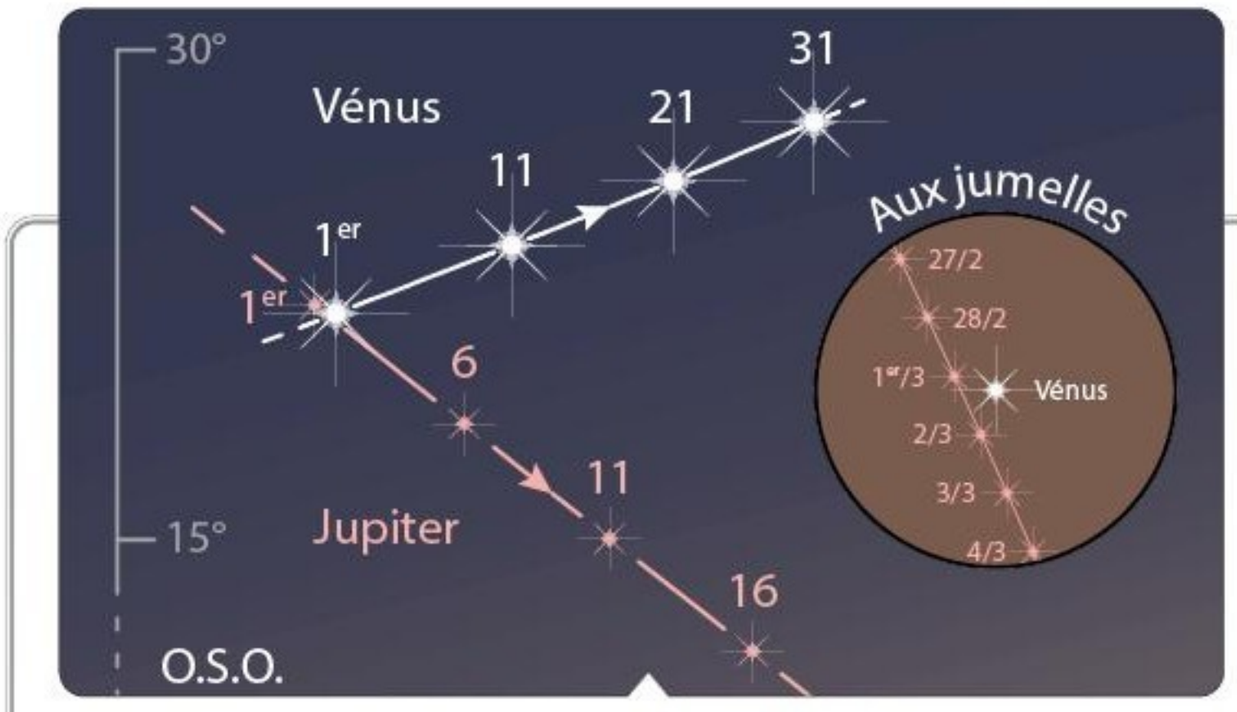
MERCURE La petite planète passe en conjonction supérieure avec le Soleil le 17. Elle devient visible en toute fin de mois en soirée, bas vers le couchant.

VÉNUS L'étoile du Berger se trouve dans des conditions d'observation de plus en plus intéressantes. Extrêmement brillante, elle domine largement l'horizon ouest quand la nuit tombe et se couche près de 3h30 après le Soleil en fin de mois.

MARS La planète Rouge a perdu beaucoup de sa superbe depuis son passage à l'opposition en décembre. Toutefois, elle demeure aisément observable à l'œil nu en raison de son éclat, certes décroissant au fil des semaines, mais toujours important. En début de nuit, on la trouve à plus de 60° de hauteur. Le 26, Mars quitte la constellation du Taureau pour entrer dans les Gémeaux.

JUPITER La planète géante n'est plus visible qu'en soirée, avant d'être engloutie, en fin de mois, par les lueurs du crépuscule.

SATURNE Desservie par la faible inclinaison de l'écliptique le matin en cette saison, la planète aux anneaux n'est pas encore observable car noyée dans les lumières de l'aube. Nous la retrouverons en fin de nuit le mois prochain.



Nous sommes une demi-heure après le coucher du Soleil. Jour après jour, Jupiter plonge vers l'horizon alors que Vénus s'élève dans le ciel. Les deux planètes se croisent en tout début de mois.

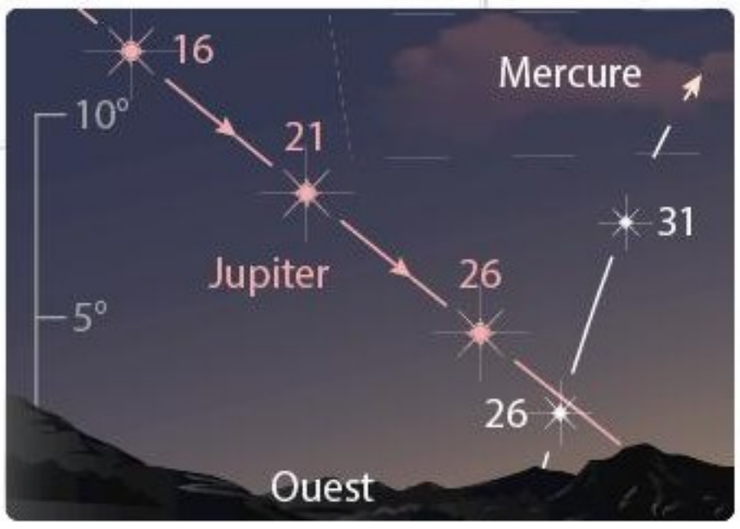
Rendez-vous céleste entre Jupiter et Vénus

DURANT LES SOIRÉES de la fin février et de début mars, Vénus et Jupiter, les deux planètes les plus brillantes du moment, se donnent rendez-vous pour un rapprochement serré. Les 1er et 2, moins de 1° les séparera et elles resteront observables simultanément dans le champ d'une paire de jumelles pendant plusieurs jours autour de ces dates.

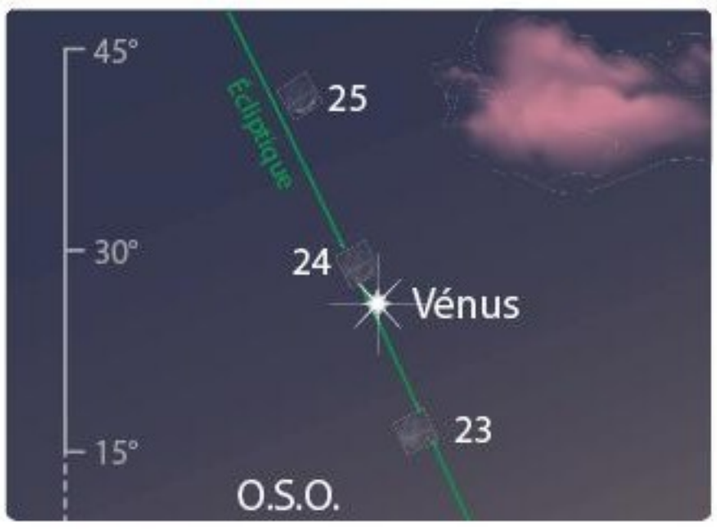
Notre conseil La luminosité très élevée de Vénus la rend immanquable dans le ciel du soir et permet ainsi de repérer aisément Jupiter puis de suivre, sur quelques nuits, le mouvement relatif des deux planètes.

L'appli du mois

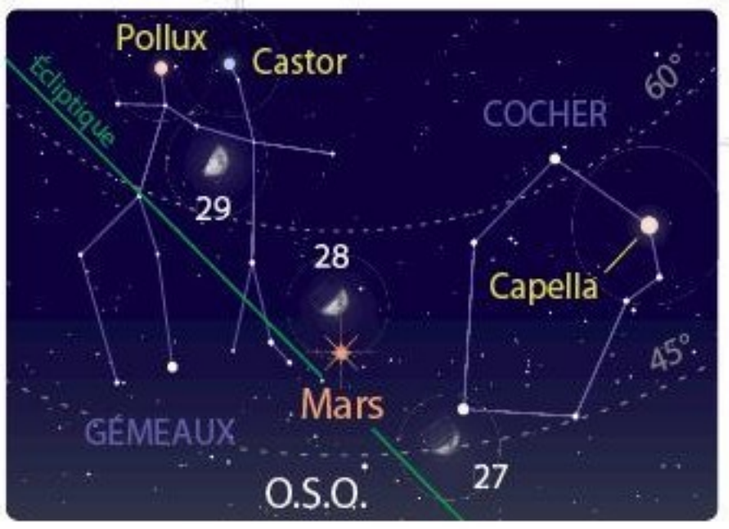
ISS EXPLORER est une application gratuite en anglais pour Android et iOS. Elle donne la possibilité de visualiser un modèle 3D de la Station spatiale internationale, de le faire pivoter, d'effectuer des zooms et de sélectionner les différents éléments qui la composent pour accéder à leur fonction et à leurs dimensions.



EN SECONDE QUINZAINE, 30 MINUTES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, suivez la lente descente de Jupiter vers l'horizon occidental et l'émergence progressive de Mercure.



LE SOIR DU 24, À UNE TRENTAINE DE DEGRÉS DE HAUTEUR, un fin croissant de Lune et sa magnifique lumière cendrée seront à un peu plus de 3° de l'étincelante Vénus.



LE SOIR DU 28, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, le premier quartier de Lune se trouvera à moins de 4° au nord de Mars, au cœur des constellations de l'hiver finissant.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de mars

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Le changement climatique n'est pas une crise mais une trajectoire

L'été 2022 fut emblématique d'un climat qui dérive en raison de l'influence humaine : chaleurs extrêmes, sécheresse pluriannuelle, mortalité massive des arbres, incendies… et, à l'opposé, pluies diluviennes qui, en quelques heures, submergent des quartiers périphériques et saccagent les cultures. Pour la plupart des décideurs et citoyens, ces symptômes du changement climatique semblaient inenvisageables aussi tôt dans le siècle. Et pourtant ! la probabilité de vivre en 2022 un tel été catastrophique n'était pas faible. Estimée à partir des projections climatiques évaluées par le Giec, on trouve une valeur proche de 1 sur 10, ce qui en fait un événement « rare » mais en aucun cas exceptionnel dans un climat déjà réchauffé de +1,7 °C en moyenne en France. Durant la décennie 2030, la probabilité de connaître un été aussi chaud que 2022 doublera inéluctablement. Le changement climatique n'est pas une crise mais une trajectoire. On parle souvent de « niveau de réchauffement » (+1,5 °C, +2 °C, +3 °C), indicateur pertinent pour les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Mais en matière de gestion des risques, il faut considérer l'ensemble du champ des possibles climatiques pour un niveau de réchauffement donné, afin de se préparer à des événements conséquents. L'été 2022 a révélé le fossé entre l'adaptation mise en œuvre et celle qui serait nécessaire. Le niveau de préparation aux aléas climatiques, en présence de connaissances établies, évaluées, partagées, publiques, est un choix politique. L'été 2023 a une chance sur dix d'être plus chaud que l'été 2022. Serons-nous prêts ? ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHÉMATIQUES PAR CLAIRE MATHIEU

Mieux articuler les enseignements secondaires et supérieurs

La jonction entre enseignements secondaire et supérieur est une période délicate.
Les universitaires ont accès aux dossiers des candidats mais les candidats et leurs établissements ne leur sont pas connus ; sans épreuves scolaires nationales (auxquelles le calendrier fait obstacle), il leur est difficile de comparer les dossiers. L'information est insuffisante pour qu'il soit possible de faire un classement sans part d'arbitraire. Cependant, une autre voie est peut-être envisageable.
Les universités sont de grande taille et préparent à de nombreux diplômes. Serait-il envisageable d'avoir une première année commune, par exemple, à toutes les formations en sciences « dures » ? Cela permettrait de connaître les étudiants personnellement bien mieux qu'une lettre de motivation, et aiderait aussi à combler des lacunes dues non à l'étudiant mais aux circonstances de ses études secondaires, d'où une orientation vers une deuxième année en meilleure connaissance de cause, ainsi qu'une sélection plus juste pour les parcours en double licence. Bien sûr, ce n'est pas sans inconvénient. Ainsi, cela reculerait d'autant la période de spécialisation disciplinaire de l'étudiant. En somme, il s'agirait d'une orientation en deux phases : en terminale, le choix de l'université, puis en première année universitaire, le choix de la formation dans laquelle l'étudiant continuera ses études l'année suivante. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

L'éthique de l'étiquette illustrée par le Nutri-score

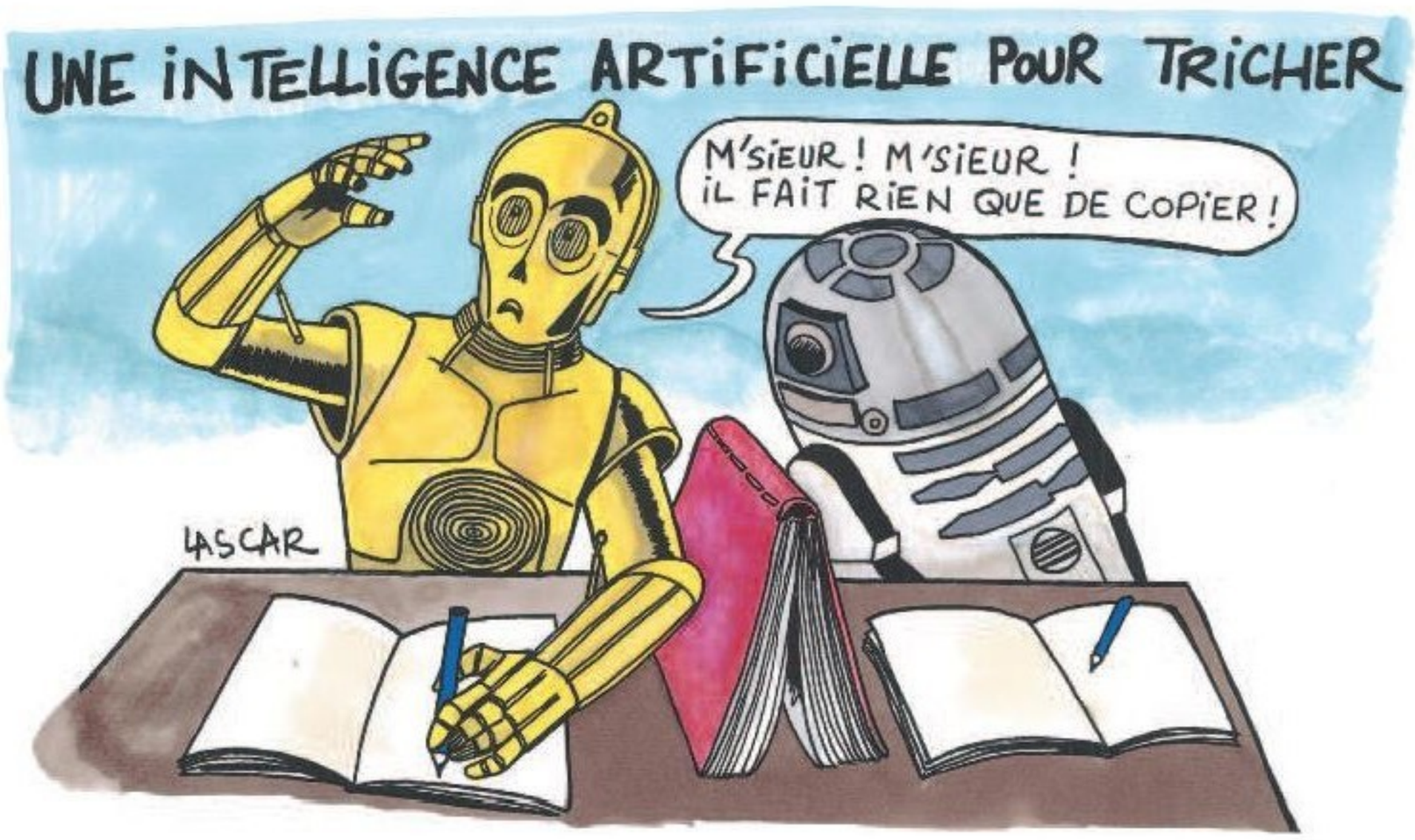
Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

La bataille de l'étiquetage fait rage dans les institutions européennes ! En cause, le « Nutri-score » des denrées alimentaires. Quoique facultatif, son ton criard en incommode beaucoup, surtout dans les pays du sud de l'Europe, où les industries alimentaires se dressent contre ce dispositif. Comment accepter qu'on jette l'opprobre sur toute la charcuterie sans discernement, même sur le si délicat jambon de Parme ? Ou qu'on assortisse l'huile d'olive d'un score aussi infamant que celui des sodas sucrés ? Rapporter les graisses ou les sucres au poids n'a aucun sens : on ne boit pas l'huile d'olive au verre ! Il faudrait les ramener à la portion… Mais, comment procéder ?

À l'opposé, les associations de consommateurs, soucieuses de santé publique, aspirent à une information limpide qui aide à choisir ; le détail de la composition doit figurer, mais, trop opaque, il demande à être complété d'une marque facile à interpréter. On objectera que le label stigmatise ; qu'il simplifie sans nuance ; qu'il faudrait l'assortir de renseignements d'ordres différents sur le traçage carbone de la fabrication des aliments ou le recyclage des emballages. Sur ces deux points, une information synthétique se traduirait par un ou deux labels supplémentaires, ce qui exigerait un score pluridimensionnel. Et, là encore, les critiques risqueraient de pleuvoir sur le caractère réductionniste des nouveaux labels.

L'étiquette est là pour résumer, au risque de retrancher trop et, par là, de flétrir. L'étymologie du mot étiquette renvoie à l'ancien français estechier qui signifiait « enfoncer, ficher, transpercer ». Que l'étiquette marque un coin, qu'elle entame l'objet et la confiance qu'on y met, sans doute. Et, cela pourrait être quelque peu injuste. Il convient donc de défendre une éthique de l'étiquette, de sorte qu'elle n'induise pas en erreur et, en même temps, que l'on invite le consommateur à se demander ce qu'il y a derrière et qu'on lui en donne les clefs. ■

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

Surgi fin décembre 2022, ChatGPT laisse les internautes dans une forme de sidération. Le programme d'intelligence artificielle reconnaît le langage naturel — notre façon d'écrire dans la vie de tous les jours — et produit en réponse, et aussitôt, des textes d'une fluidité stupéfiante. Difficile, voire impossible de deviner que c'est une machine qui est derrière ! Du côté des élèves, collégiens et lycéens, on susurre que c'est l'arme fatale… pour la triche. Sollicité par *Sciences et Avenir*, le ministère de l'Éducation appelle à la tempérance : ChatGPT n'est *« pertinent, ni pour faire ses devoirs, ni pour progresser »*, écrit la rue de Grenelle. Pas sûr que cet appel à la raison suffise ! **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

POLLUTION

Combien de déchets y a-t-il dans l'espace ?

Sophie A.

Depuis le lancement de Spoutnik en 1957, le nombre d'objets en orbite autour de la Terre ne fait qu'augmenter, et avec eux quantités de rebuts. Des objets entiers, comme des satellites désactivés, mais surtout des fragments résultant de l'explosion de satellites et autres étages de lanceurs. Selon l'Agence spatiale européenne, 36 500 débris de plus de 10 centimètres de diamètre gravitent autour de notre planète, 330 millions si l'on ajoute ceux supérieurs à 1 millimètre ! L'ensemble pèserait plus de 9600 tonnes. Des millions d'objets se déplaçant à des milliers de km/h, risquant de heurter les plus de 5000 satellites en service. ■

Lise Loumé @Lise_Loume

PHYSIOLOGIE

Pourquoi avons-nous des dents de lait ?

Clémentine B.-M.

Apparaissant les trois premières années de vie et disparaissant vers 13 ans, nos 20 dents de lait ont trois rôles très importants : elles servent à l'enfant à se nourrir, elles permettent la mise en place de la parole et elles guident les dents définitives pour qu'elles poussent dans la bonne position. Mais elles sont très fragiles en raison de leur émail plus fin que celui des 32 dents définitives. Pourquoi ces dernières ne poussent-elles pas directement ?
À cause d'un problème de place : plus grosses, elles ne tiendraient pas dans une mâchoire d'enfant. À l'inverse, si nous conservions nos dents de lait à l'âge adulte, nous rencontrerions des difficultés de mastication eu égard à leur petite taille. ■

Anne-Sophie Tassart @TassartAS

GETTY IMAGES

L'humidité relative, la pression atmosphérique et la vitesse du vent augmentent la probabilité de douleur de 20 %, selon une étude.

RHUMATOLOGIE

Avons-nous davantage mal aux articulations lorsqu'il pleut ?

Jérémy H.

« *Ah, il va pleuvoir* », disent parfois les personnes atteintes de rhumatismes en se tenant leur articulation gonflée. Leur ressenti est justifié et les rhumatismes réagissent bien à la météo… mais pas au froid ni à la pluie, contrairement aux idées reçues. C'est ce qu'a mis en évidence une étude publiée dans la revue *Nature* en 2019. Des chercheurs britanniques ont demandé à 2658 personnes souffrant de douleurs chroniques de consigner pendant quinze mois dans une application leur niveau de douleur, leur humeur et leur activité physique. En croisant ces données avec la météo locale, ils ont conclu que leurs douleurs n'étaient liées ni à l'inactivité physique, ni à la déprime — souvent accusées d'empirer cette sensation les jours de pluie. Selon l'étude, en revanche, l'humidité relative, la pression atmosphérique et la vitesse du vent augmentaient la probabilité de douleur de 20 %. L'humidité relative est le degré de saturation de l'air en vapeur d'eau par rapport au maximum de ce qu'il pourrait absorber. Or, cette absorption maximale varie avec la température : un air chaud pourra assimiler plus d'eau avant de saturer qu'un air froid. En revanche, ni la pluie ni le froid n'avaient d'action notable en soi. Pourquoi cet effet de l'humidité, de la pression et du vent sur la douleur ? S'agit-il d'une stimulation des neurones de la douleur ? d'une modification du cartilage ? Les scientifiques ne l'expliquent pas encore. ■

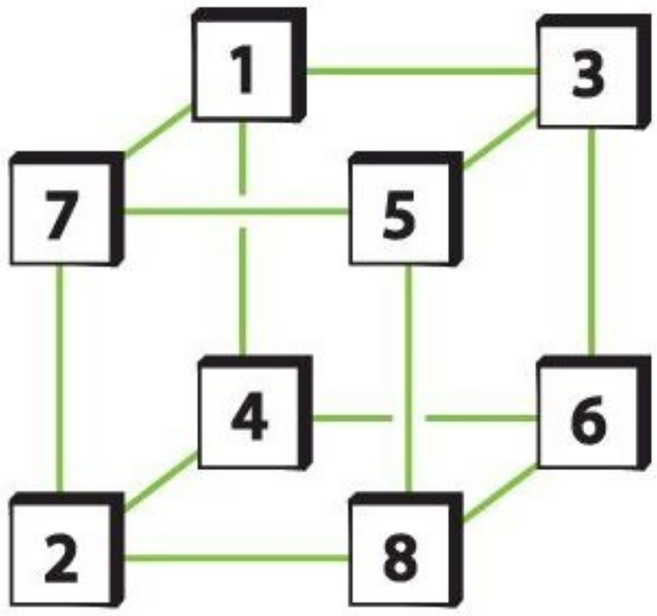
Camille Gaubert @CamilleGaubertb

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 912, février 2023

Logique autoréférente

1 **3**	6 **2**	2	6	4
2 **6**	7 **2**	1	1	7
3 **4**	8 **1**	3	2	9
4 **3**	9 **2**	4	8	3
5 **0**	0 **2**	9	7	0

Sudocubique



Logique fléchée

2, 8, 14, 20, 26 (+ 6, + 6, + 6...)
36, 32, 30, 26, 24 (- 4, - 2, - 4, - 2)
32, 22, 34, 24, 36 (- 10, + 12, - 10, + 12)
8, 10, 13, 17, 22 (+ 2, + 3, + 4, + 5)

Des hommes et des moutons

S'il n'y avait que des hommes, chaque tête irait avec 2 pieds, soit un total de 24 pieds. Les 20 pieds supplémentaires appartiennent à des moutons, à raison de 2 par mouton.
Il y a donc 10 moutons et 2 hommes.

La Rochefoucauld au goutte-à-goutte

La philosophie triomphe aisément des maux passés et des maux à venir, mais les maux présents triomphent d'elle.

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 904 Les aliments qui augmentent l'espérance de vie

N° 905/906 Pourquoi ? Dossier spécial

N° 907 Messages de l'univers lointain

N° 908 7 traitements qui révolutionnent la médecine

N° 909 L'avant Big Bang

N° 910 La science lit dans les pensées

N° 911 Les origines de la vie

N° 912 Climat : inverser le réchauffement, c'est possible

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 904 ❑ N° 905/906 ❑ N° 907 ❑ N° 908
❑ N° 909 ❑ N° 910 ❑ N° 911 ❑ N° 912

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

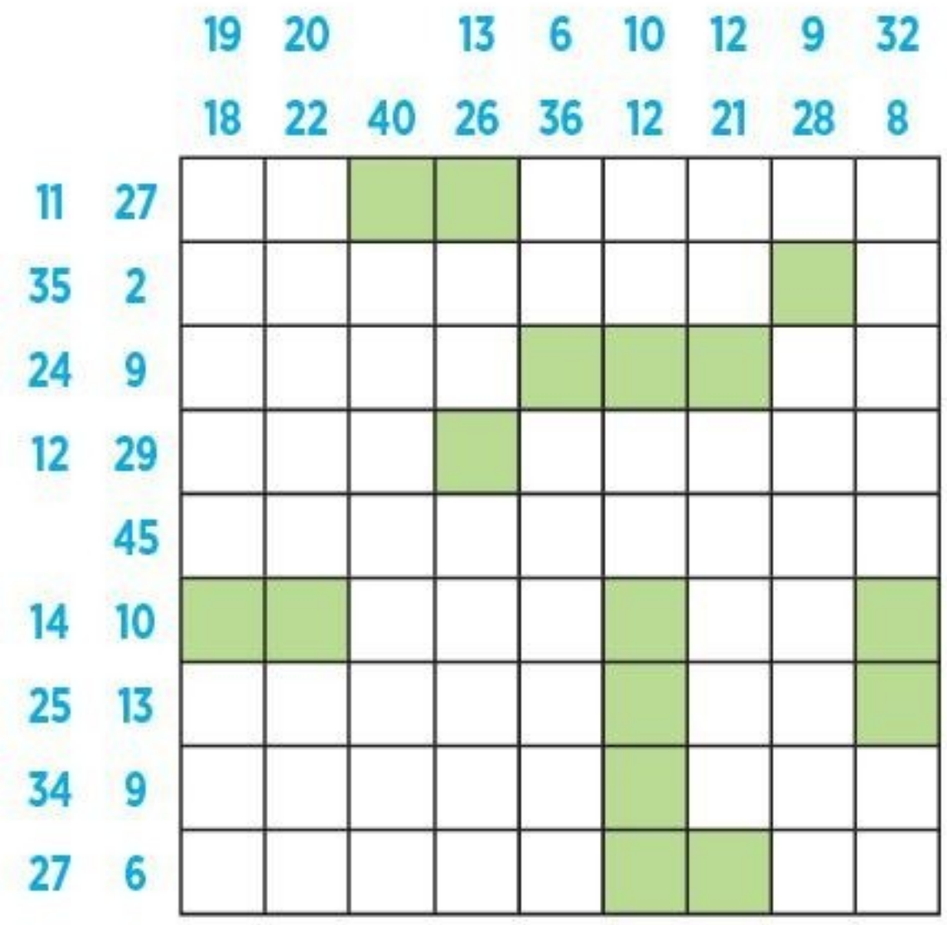
PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Carré latin

Chaque ligne et chaque colonne sont composées des nombres de 1 à 9. Les sommes des segments blancs, horizontaux et verticaux figurent en marge. Complétez cette grille.



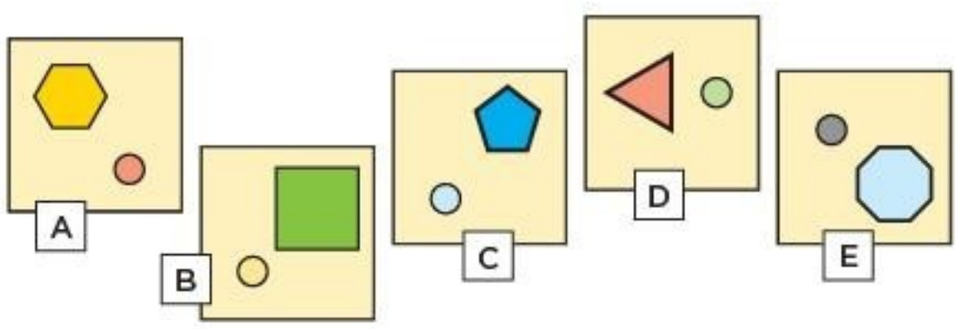
Addition trouée

Complétez cette addition avec des chiffres qui n'y sont pas déjà.

```
  4 2 . 7
+ . 6 1 .
---------
1 . 8 5 .
```

L'intrus dans la logique

Parmi ces cinq éléments, lequel ne suit pas la logique des quatre autres ?



Musique et panique

“ Quoique palmipèdes, les pingouins sont mélomanes.
“ Certains manchots parfois, le soir, sont pris de panique.
“ Un esprit clair est indispensable pour apprécier la musique.
“ Tout mélomane, en toutes circonstances, apprécie la musique.
“ La panique obscurcit l'esprit.

Si l'on accepte ces affirmations, les pingouins peuvent-ils être des manchots ?

Autoréférence hexadécimale

Dans cette grille en système hexadécimal où les nombres vont de 0 à 9 suivis des majuscules de A à F, les valeurs (gros chiffres) des deux colonnes de gauche indiquent le nombre d'occurrences de chaque chiffre (de 0 à F) présentes dans l'ensemble de la grille. Les coins de ces 16 cases indiquent de quel chiffre il s'agit.

Complétez de façon cohérente. L'emplacement des chiffres à fond bleu est indifférent.

O 1	8 3	1	2	5	5	9	7
1	9 3	7	A	8	1	B	9
2 5	A 6	7	C	7		2	
3 6	B	2			2	5	5
4 4	C 4	F	6	5		A	D
5 6	D	C	A		7	B	2
6	E	B	8	9	A		3
7 6	F 3	C	A	F		D	6

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE
dès **5€**

LABORATOIRES ILAPHARM

www.ilapharm.com

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Jambes légères
VIGNE ROUGE BIO
Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables.**

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO
Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3).*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO
Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(1), (2), (5).*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO
Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel.**

6€ 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C
Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

6€ 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO
Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences.** *(1), (10).*

6€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO
Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie.** Pour un **bon confort urinaire.**

5€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6
Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux.** *(6), (8).*
Allergène : **poisson.**

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO
Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** et possède un **effet cardioprotecteur.** *(7).*

6€ 30 gélules

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO
Le Safran Bio aide à **améliorer l'érection** et **stimule le désir sexuel.** *(2), (4).*

6€ 20 gélules

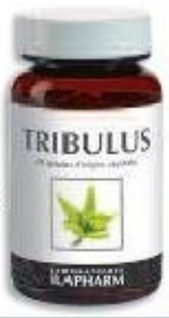
Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO
Stimulant et **énergisant,** il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire.**

6€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO
L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.** *(1), (2), (9).*

6€ 45 gélules

Capacité sexuelle
TRIBULUS
Il favorise le **désir,** la **capacité** et les **performances sexuelles** et participe à la bonne santé des organes reproducteurs.



6€ *(2), (11).* 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO
Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité.** Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO
Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5€ 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO
Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9).*

6€ 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

LA LAMPE DYNAMO ÉCOLO

OFFERTE

SANS PILE et RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT, cette lampe dynamo écolo, vous fournira un éclairage constant, en toutes circonstances.

+

Les Frais de Port
Dès 15€ d'achat **OFFERTS**
0€

+

dès **5€** **Tous vos produits**

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	5,00€
Safran BIO	6,00€
Maca BIO	6,00€
La Lampe Dynamo Écolo	OFFERTE
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**28,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. (11) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

OFFRE DÉCOUVERTE SANS ENGAGEMENT - BON DE COMMANDE

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....
Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| 19|_|_|
E-mail* : .....
pour recevoir les **Offres promotionnelles par mail d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**
Recommandé pour la livraison.* de **ses partenaires ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**
N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_|_|_|
Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		6€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		6€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		6€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PGRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** ma **LAMPE DYNAMO ÉCOLO** et mon **Catalogue**				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 5,80€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 5,80€**				
CODE PRIVILÈGE : **CS439**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 5,80€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADBME emballages : FR202486_01JWKA, ADBME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires Ilapharm, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS
*Envoyez votre **réglement par chèque, avec votre bon de commande,** il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · Traitement Rapide 24h COLISSIMO

POUR COMMANDER :

Par internet :
www.ilapharm.com

Par téléphone :
01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :
Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

nouveau

CRÉATION ÉPHÉMÈRE N°4

Un café d'exception
issu des terres volcaniques du Laos

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE, 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EUROS.